普通高等教育“十三五”规划教材
电 子 电 气 基 础 课 程 规 划 教 材

电工电子技术

（第3版）

樊立萍　王　娜　刘　晶　主编

電子工業出版社
Publishing House of Electronics Industry
北京 • BEIJING

VISIT…

LANZAROTE Caliente.com

内 容 简 介

本书全面系统地介绍了电工电子技术的基本理论及应用分析。全书分为 8 章，第 1 章到第 4 章为电路分析基础部分，内容包括电路的基本概念与基本定律、直流电路和正弦交流电路的分析方法；第 5 章为三相异步电动机及其简单控制，以及几种电动机控制应用电路和继电控制应用电路；第 6 章至第 8 章为电子技术部分，主要包括二极管特性及其整流电路、三极管及其基本放大电路、集成电路等内容。为了便于读者阅读和理解电子技术理论，在每章都有应用举例一节，遴选多个极具特色的工程应用实例，着重加强了基本理论与实际应用的有机结合，以强化工程应用能力。

本书可以作为本/专科非电类专业的教材或教学参考书，也可供有关专业师生和工程技术人员自学参考。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有，侵权必究。

图书在版编目（CIP）数据

电工电子技术 / 樊立萍，王娜，刘晶主编. —3 版. —北京：电子工业出版社，2017.4
电子电气基础课程规划教材
ISBN 978-7-121-31333-2

Ⅰ. ①电…　Ⅱ. ①樊…　②王…　③刘…　Ⅲ. ①电工技术－高等学校－教材　②电子技术－高等学校－教材　Ⅳ. ①TM②TN

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2017）第 076249 号

策划编辑：竺南直
责任编辑：桑　昀
印　　刷：
装　　订：
出版发行：电子工业出版社
　　　　　北京市海淀区万寿路 173 信箱　邮编 100036
开　　本：787×1 092　1/16　印张：14.5　字数：371.2 千字
版　　次：2000 年 7 月第 1 版
　　　　　2017 年 4 月第 3 版
印　　次：2017 年 4 月第 1 次印刷
定　　价：29.80 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系，联系及邮购电话：（010）88254888，88258888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn，盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式：davidzhu@phei.com.cn。

前　　言

“电工电子技术”是高等院校非电类理工科各专业的一门重要的技术基础课。电工电子技术的应用遍及社会生产各领域和人类生活的各方面，对国民经济发展及生活水平提高都具有至关重要的作用。

本书从适应工科高等院校非电类应用型工程人才培养需求出发, 遵循“面向实际，夯实基础，突出重点，强化应用”的原则，结合电工电子技术的发展成果与高等教育改革需要，并充分考虑全国工程教育专业认证标准规定相关教学要求及 OBE 教育理念和 CDIO 培养模式需求，在原《电工电子技术》（第 2 版）教材基础上修订编写而成。本书强调知识的渐进性，兼顾知识的系统性，力求做到学科体系完整、知识简洁明了、理论联系实际、时代特色鲜明，并尽量将项目驱动式教学主线贯穿整体。

本书基本保留了第 2 版的结构层次和传统内容，以“保基础、重实践、少而精”为特色，但在内容论述、实例选取上做了较大更新和补充，特别是在每章都增加了应用举例一节，遴选多个极具特色的工程应用实例，着重加强了基本理论与实际应用的有机结合，以强化工程应用能力。全书分为 8 章，第 1 章到第 4 章为电路分析基础部分，内容包括电路的基本概念与基本定律、直流电路和正弦交流电路的分析方法，通过增加人体电路、摩托车照明灯电路、家用电饭锅加热及保温电路、万用表分流电路、汽车发动机启动点火装置电路等大量实例来加深学生对基本定理、电路分析方法的理解和应用；第 5 章为三相异步电动机及其简单控制部分，增加了几种电动机控制应用电路和继电控制应用电路；第 6 章至第 8 章为电子技术部分，主要包括二极管特性及其整流电路、三极管及其基本放大电路、集成电路等内容，增加了镍镉电池充电器电路、趣味电子“蜡烛”电路、发光式逻辑测试笔电路、串联型直流稳压电源电路、交流闪烁指示灯电路和多媒体计算机有源音响功放电路等实际应用电路，便于读者阅读和理解电子技术理论。

本书由沈阳化工大学樊立萍教授策划并组织编写。第 1 章、第 5 章由樊立萍教授编写；第 2 章、第 3 章、第 4 章由王娜博士编写；第 6 章、第 7 章、第 8 章由刘晶博士编写。樊立萍教授最后统稿并定稿。

本书可以作为本/专科非电类专业的教材或教学参考书，也可供有关专业师生和工程技术人员自学参考。

由于时间限制和编者学识的局限，书中难免有错误和遗漏，敬请广大读者在使用过程中提出宝贵意见。

编　者

2017 年 1 月

目　录

第 1 章　电路的基本概念与基本定律 …… 1

1.1　电路组成与电路模型 …… 1
1.1.1　电路组成 …… 1
1.1.2　电路作用 …… 1
1.1.3　电路模型 …… 2
1.1.4　参考方向 …… 2
1.2　理想电路元件 …… 3
1.2.1　理想有源元件 …… 3
1.2.2　理想无源元件 …… 4
1.3　电能与电功率 …… 5
1.4　电路的工作状态 …… 7
1.4.1　负载状态 …… 7
1.4.2　空载状态 …… 8
1.4.3　短路状态 …… 8
1.5　基尔霍夫定律 …… 10
1.5.1　电路相关名词 …… 10
1.5.2　基尔霍夫电流定律（KCL） …… 10
1.5.3　基尔霍夫电压定律（KVL） …… 11
1.5.4　基尔霍夫定律的应用 …… 12
1.6　应用举例 …… 13
本章小结 …… 15
习题 1 …… 16

第 2 章　电路的基本分析方法 …… 19

2.1　电阻的串联、并联与混联 …… 19
2.1.1　电阻的串联 …… 19
2.1.2　电阻的并联 …… 21
2.1.3　电阻的混联 …… 23
2.2　支路电流法 …… 24
2.3　叠加原理 …… 26
2.4　戴维南定理 …… 28
2.5　应用举例 …… 32
本章小结 …… 35
习题 2 …… 35

第 3 章　单相正弦交流电路……38

3.1　正弦交流电基本概念……38
3.1.1　正弦量……38
3.1.2　正弦量的三要素……38
3.1.3　同频率正弦量的比较……40
3.2　正弦量的相量表示……41
3.2.1　向量与复数……41
3.2.2　正弦量的相量表示……43
3.3　单一参数交流电路……44
3.3.1　电阻元件的交流电路……44
3.3.2　电感元件的交流电路……46
3.3.3　电容元件的交流电路……47
3.4　一般单相交流电路……49
3.4.1　基尔霍夫定律的相量形式……49
3.4.2　阻抗及其串、并联……50
3.4.3　RLC 串联交流电路……52
3.4.4　交流电路的谐振……53
3.5　交流电路的功率……56
3.5.1　瞬时功率……56
3.5.2　有功功率与功率因数……57
3.5.3　无功功率……57
3.5.4　视在功率……58
3.5.5　功率因数的提高……60
3.6　应用举例……63
本章小结……66
习题 3……67

第 4 章　三相电路……72

4.1　三相交流电源……72
4.1.1　三相对称电源……72
4.1.2　三相电源的连接……73
4.2　三相负载的连接……75
4.2.1　星形（Y形）的连接……75
4.2.2　三角形（△形）的连接……76
4.3　三相电路的计算……77
4.3.1　三相对称电路的计算……77
4.3.2　不对称三相电路的计算……79

4.4 三相电路的功率……81
4.4.1 瞬时功率……81
4.4.2 有功功率……82
4.4.3 无功功率……83
4.4.4 视在功率……83
4.5 安全用电……84
4.5.1 触电方式……84
4.5.2 触电防护……86
4.5.3 静电防护和电气防火防爆……87
4.6 应用举例……87
本章小结……93
习题 4……94

第 5 章 三相异步电动机及其简单控制……96

5.1 三相异步电动机的基本构造……96
5.1.1 定子……96
5.1.2 转子……97
5.2 三相异步电动机的工作原理……98
5.2.1 旋转磁场……98
5.2.2 工作原理……100
5.3 三相异步电动机的转矩……101
5.3.1 三相异步电动机的电路分析……101
5.3.2 电磁转矩……103
5.4 三相异步电动机的机械特性……104
5.5 三相异步电动机的选择……106
5.5.1 三相异步电动机的铭牌数据……106
5.5.2 三相异步电动机的选择……108
5.6 三相异步电动机启动、制动与调速……109
5.6.1 三相异步电动机的启动……109
5.6.2 三相异步电动机的制动……113
5.6.3 三相异步电动机的调速……114
5.7 三相异步电动机的继电-接触器控制……116
5.7.1 常用低压电器……116
5.7.2 三相异步电动机的继电-接触器控制电路……121
5.8 应用举例……125
5.8.1 几种电动机控制应用电路……125
5.8.2 几种继电控制应用电路……127
本章小结……129
习题 5……130

第 6 章　半导体二极管及整流电路 …… 134
6.1　PN 结及其单向导电性 …… 134
6.1.1　半导体基础知识 …… 134
6.1.2　PN 结及其单向导电性 …… 135
6.2　半导体二极管 …… 137
6.2.1　基本结构 …… 137
6.2.2　伏安特性 …… 137
6.2.3　开关特性 …… 138
6.2.4　主要参数 …… 139
6.2.5　几种常用的特殊二极管 …… 139
6.3　二极管整流滤波电路 …… 141
6.3.1　单相半波整流电路 …… 141
6.3.2　单相桥式整流电路 …… 142
6.3.3　滤波电路 …… 143
6.3.4　稳压电路 …… 146
6.4　应用举例 …… 148
本章小结 …… 150
习题 6 …… 150
第 7 章　基本放大电路 …… 153
7.1　晶体三极管 …… 153
7.1.1　基本结构 …… 153
7.1.2　电流放大作用及原理 …… 154
7.1.3　特性曲线 …… 156
7.1.4　主要参数 …… 157
7.2　基本交流放大电路 …… 159
7.2.1　基本交流放大电路的组成 …… 159
7.2.2　放大电路的静态分析 …… 161
7.2.3　放大电路的动态分析 …… 163
7.2.4　稳定工作点的分压式偏置放大电路 …… 169
7.2.5　射极输出器 …… 173
7.2.6　多级放大电路 …… 175
7.3　应用举例 …… 180
本章小结 …… 181
习题 7 …… 182

第 8 章　集成运算放大器……187
8.1　集成运算放大器概述……187
8.1.1　集成电路简介……187
8.1.2　集成运算放大器的基本构成……187
8.1.3　集成运算放大器的主要参数……188
8.1.4　集成运算放大器的电压传输特性……189
8.1.5　集成运放的理想特性……189
8.2　集成运算放大电路的应用……190
8.2.1　集成运放构成运算电路……190
8.2.2　集成运放用于信号处理……196
8.3　应用举例……199
本章小结……201
习题 8……201
附录 A　《电工电子技术》实验指导……207
实验一　电路基本定理研究……207
实验二　日光灯电路及功率因数的提高……209
实验三　三相交流电路研究……211
实验四　三相异步电动机的继电接触控制……214
实验五　基本放大电路研究……216
参考文献……219

第 1 章　电路的基本概念与基本定律

本章主要介绍电路的基本概念与基本定律，着重讨论电路组成与作用、电路模型与基本电路元件、电压和电流的参考方向、电能与电功率、基尔霍夫电压定律和电流定律等。本章是学习电路基本分析方法及分析各种类型电工电子电路的基础。

1.1　电路组成与电路模型

1.1.1　电路组成

由若干电气设备或元器件按一定方式用导线连接而成的电流通路，称为电路。例如，手电筒电路由干电池、灯泡和开关用导线连接而成，如图 1.1 所示。电路中的干电池是提供电能的，称为电源；灯泡是取用电能的，称为负载；而把电源和负载连接起来的开关及导线，称为中间环节。组成电路的元器件及其连接方式尽管多种多样，但一个完整的电路都包含电源、负载和中间环节这三个基本组成部分。

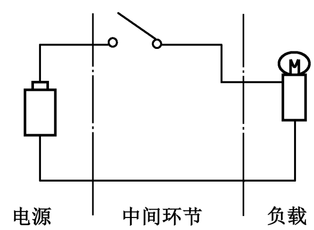


图 1.1　手电筒电路

电源是将其他形式的能量转换为电能的装置，如蓄电池、发电机等，分别将化学能、机械能转换成电能。

负载是取用电能的设备，如灯泡、电动机、电热炉等。负载的作用是将电能转换成其他形式的能量，例如灯泡将电能转换成光能，电动机将电能转换成机械能等。

中间环节主要完成电能的传输、分配和控制作用。一些实用电路的中间环节，除了开关、导线外，通常还包含保护和检测装置、变压器等。

1.1.2　电路作用

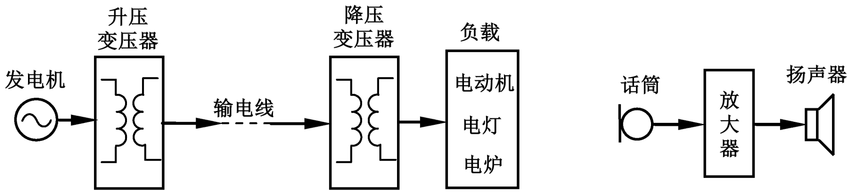
电路的作用可以从两个方面描述。

1．实现电能的传输和转换

常见的各种照明电路和动力电路就是用来输送和转换能量的，如图 1.2（a）所示的电力传输系统。对于这一类电路来说，一般要求具有较小的能量损耗和较高的效率。

2．实现信号的传递和处理

电子技术、通信技术中遇到的电路一般是以传递和处理信号为主要目的的。例如图 1.2（b）所示的扩音机电路，先由话筒把语言或音乐（通常称为信息）转换为相应的电信号，然后通过放大器对信号进行放大等处理后传递到扬声器，把电信号还原为语言或音乐。



（a）电力系统　　（b）扩音机

图 1.2　电路作用

1.1.3　电路模型

为了便于对电路进行分析与计算，通常将实际电路中的元器件用理想电路元件来表示。将实际的元器件理想化，只考虑其主要的电磁性能，而忽略其次要因素，称为理想电路元件。由理想电路元件构成的电路，称为电路模型（简称电路），一般采用特定符号和图形表示。电路模型是实际电路的抽象。手电筒的电路模型如图 1.3 所示，电池、灯泡等都已表示成相应理想电路元件或其组合。

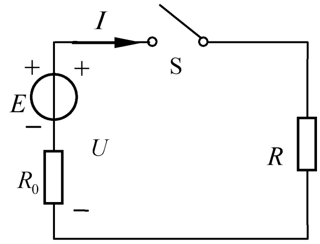


图 1.3　手电筒的电路模型

1.1.4　参考方向

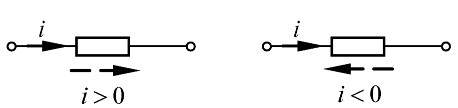
对电路进行分析时，必须知道电压、电流的方向。而电流或电压的实际方向往往是未知或者变化的。为了方便电路的分析与计算，可以任意假定一个电流或电压方向作为参考方向。

1．电流参考方向

为了计算方便，电流的参考方向可以任意选定。但电流的方向是客观存在的，电流的实际方向是正电荷运动的方向。选定参考方向后，当电流实际方向与参考方向一致时，电流取正；当电流实际方向与参考方向相反时，电流取负，如图 1.4 所示。图中实线箭头标示电流参考方向，虚线箭头标示电流实际方向。

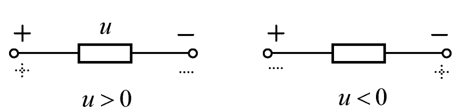
2．电压参考方向

电压的参考方向可以任意指定。电压的方向通常用参考极性（“+”、“−”）表示。电压的实际方向规定为由高电位端（“+”极端）指向低电位端（“−”极端）。参考方向选定后，当实际方向与参考方向一致时，电压为正；当实际方向与参考方向相反时，电压为负，如图 1.5 所示。



（a）一致方向　　（b）相反方向

图 1.4　电流参考方向



（a）一致方向　　（b）相反方向

图 1.5　电压参考方向

3. 关联参考方向

一个元件的电流和电压的参考方向可以独立地任意指定。如果指定流过元件的电流的参考方向是从标以电压正极性的一端指向负极性的一端，即两者的参考方向一致，则把电流、电压的这种参考方向称为关联参考方向；反之，则称为非关联参考方向，如图 1.6 所示。

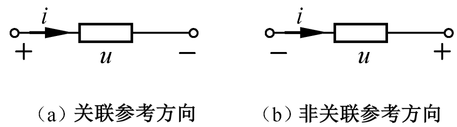


图 1.6　关联方向与非关联方向

1.2　理想电路元件

1.2.1　理想有源元件

1. 电压源

理想电压源是一种能够独立向电路提供电压的电源。理想电压源有两个基本性质：①无论负载如何，其端电压保持为某一给定值或某一给定的时间函数；②流过它的电流由外电路决定。

理想电压源的图形符号如图1.7所示，一般理想电压源均可表示成如图1.7（a）所示形式，其中 U_S 表示电压源电压，“+”、“−” 分别代表电源参考极性的正、负极。直流电压源也可表示成如图1.7（b）所示形式，其中E代表电源电动势。

理想电压源是不存在的。实际电压源在工作时会产生一定的能量损耗，这种损耗其实是由电源内阻造成的，所以，实际电压源可以用一个理想电压源与电阻的串联模型表示。电压源以给外电路提供电压为目的，电池及发电机是目前使用最广泛的电压源。

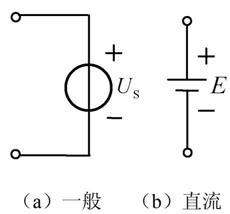


图 1.7　理想电压源

2. 电流源

在日常生活中，常常看到手表、计算器、热水器等采用太阳能电池作为电源，这些太阳能电池是采用硅、砷化镓等材料制成的半导体器件。它与干电池不同，当受到太阳光照射时，将激发产生电流，该电流是与入射光强度成正比的，基本上不受外电路影响，因此像太阳能电池这类电源，在电路中可以表示成电流源。

理想电流源是一种能够独立向电路提供电流的电源。理想电流源有两个基本性质：①不管外部电路如何，其输出电流总能保持一恒定值或某一给定的时间函数；②它的端电压取决于外电路。理想电流源元件模型如图 1.8 所示，其中 I_S 表示电流源电流，箭头表示电流参考方向。

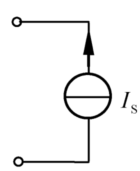


图1.8　理想电流源

理想电流源是不存在的。实际电流源可以用一个理想电流源与电阻的并联模型来表示。

1.2.2　理想无源元件

1．电阻元件

电阻元件是将电能转换为热能的二端耗能元件，如电炉、电灯等，其模型如图1.9所示。加在电阻元件两端的电压u与通过该元件的电流i成正比，即符合欧姆定律。在关联参考方向下，表示为

$$u = Ri \tag{1-1}$$

欧姆定律表达式中的比例系数 R 就是表征导体对电流呈阻碍作用的电阻阻值。电阻的单位为欧姆，简称欧，用符号“Ω”表示。若电阻不随电压或电流的变化而变化，则称该电阻为线性电阻。线性电阻的阻值是个常数，其伏安特性（即 $u = f(i)$ 曲线）是一条直线。

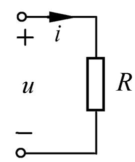


图 1.9　电阻元件

2．电感元件

电感元件是实际线圈的一种理想化模型。工程中得到广泛应用的线圈是导线绕制的，如图 1.10 所示。当线圈中通以时变电流 i 时，将产生磁通Φ，如果磁通Φ与 N 匝线圈都交链，则磁链为

$$\Psi = N\Phi$$

磁链是电流 i 的函数。当磁链与电流的参考方向符合右手螺旋定则时，则有

$$\Psi = Li \tag{1-2}$$

式中，L 称为线圈的电感，其单位是亨（H），磁链的单位是韦伯（Wb），所以式（1-2）也称韦安特性。电感的元件模型如图 1.11 所示。若电感元件中的磁链与电流呈线性关系，即 L 为常值，则称为线性电感。当电感两端电压与通过电感的电流属于关联参考方向时，根据楞次定律，有

$$u = \frac{\mathrm{d}\Psi}{\mathrm{d}t} \tag{1-3}$$

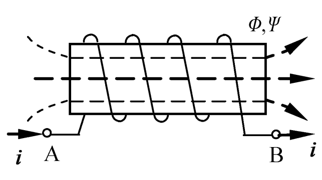


图 1.10　实际线圈

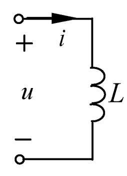


图 1.11　电感元件

将$\Psi = Li$带入式（1-3），得

$$u = L\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} \tag{1-4}$$

即电感电压与电流的变化率成正比。当通过电感的电流有变化时，电感两端才有电流；当电流不随时间变化时，电感两端电压为零。因此，电感是一种动态元件，在直流电路中，电感相当于短路。

3．电容元件

在电力系统和电子装置中常用的电容器就是典型的电容元件。电容是用来表征电路中电场能量储存这一物理性质的理想元件。电容元件模型如图 1.12 所示。在电容两端施加电压 u，它的极板上就会储存电荷 q，两者之间的关系满足

$$q = Cu \tag{1-5}$$

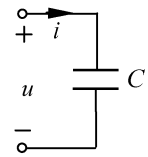


图 1.12　电容元件

式中，C 称为电容，其单位是法拉（F）。由于法拉的单位太大，工程上多采用微法（μF）或皮法（pF）。$1\mu F=10^{-6}F$，$1pF=10^{-12}F$。若电容元件中的电量与电压呈线性关系，即 C 为常值，则称为线性电容。

当电容两端的电压变化时，极板上的电荷量也随之变化，和极板连接的导线上就有电流 i。当电压与电流为关联参考方向时，有

$$i = \frac{\mathrm{d}q}{\mathrm{d}t} = C\frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}t} \tag{1-6}$$

可见，电容电流与电压的变化率成正比。当电容两端的电压有变化时，电容才有电流通过；当电压不随时间变化时，电容电流为零。因此，电容属于动态元件，在直流电路中，电容相当于开路。

1.3　电能与电功率

电路中通过电流时，就伴随着电能的传送或转换。电能传送或转换的速率称为电功率，简称功率，即

$$p = \frac{\mathrm{d}W}{\mathrm{d}t} \tag{1-7}$$

功率的单位是瓦（W）。若元件的电压和电流采用关联参考方向，则该元件吸收的功率为

$$p = ui \tag{1-8}$$

在关联参考方向下，按照上式计算所得结果，如果采用非关联参考方向，则需要添加负号；计算结果若 $p > 0$，则表示元件吸收或消耗功率，即该元件是作为负载存在的；若 $p < 0$，则表示元件发出或释放功率，即该元件是作为电源存在的。

元件在一段时间 $(0 \sim t)$ 内消耗的电能为

$$W = \int_0^t p\mathrm{d}t = \int_0^t ui\mathrm{d}t \tag{1-9}$$

能量的单位是焦耳（J），但电能的常用单位是千瓦时（kW · h），也即度，$1\mathrm{kW \cdot h} = 3.6 \times 10^6 \mathrm{J}$。

对于电阻元件，其消耗功率为

$$p_{\mathrm{R}} = ui = i^2 R = \frac{u^2}{R} \tag{1-10}$$

从0到t的时间内电阻消耗的电能为

$$W_R = \int_0^t p\mathrm{d}t = \int_0^t i^2 R\mathrm{d}t \tag{1-11}$$

电阻元件把吸收的电能全部转换成热能。

对于电感元件，其消耗功率为

$$p_L = ui = Li\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} \tag{1-12}$$

从0到t的时间内，电感电流由0变为I，电感储存的磁场能量为

$$W_L = \int_0^t p\mathrm{d}t = \int_0^t L\mathrm{i}\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}\mathrm{d}t = \frac{1}{2}LI^2 \tag{1-13}$$

即电感储存的磁场能量只取决于该时刻的电流值。

对于电容元件，其消耗功率为

$$p_C = ui = Cu\frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}t} \tag{1-14}$$

从0到t的时间内，电容电压由0变为U，电容储存的电场能量为

$$W_C = \int_0^t p\mathrm{d}t = \int_0^t \mathrm{Cu}\frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}t}\mathrm{d}t = \frac{1}{2}CU^2 \tag{1-15}$$

即电容储存的电场能量只取决于该时刻的电压值。

例1.1　电路如图1.13所示，已知$U_1 = 14\mathrm{V}$，$I_1 = 2\mathrm{A}$，$U_2 = 10\mathrm{V}$，$I_2 = 1\mathrm{A}$，$U_3 = -4\mathrm{V}$，$I_4 = -1\mathrm{A}$，求各元件的功率，并说明各元件是电源还是负载?

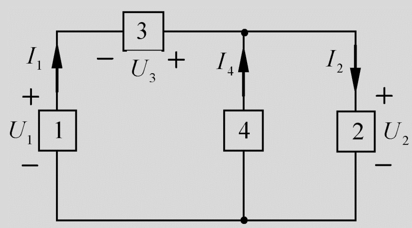


图1.13　例1.1图

解：元件1的端电压与其通过的电流为非关联参考方向，故元件吸收功率为

$P_1 = -U_1 I_1 = -14\times 2\mathrm{W} = -28\mathrm{W} < 0$

则元件1发出功率，是电源。

元件2的电压和电流为关联参考方向，故元件吸收功率

$P_2 = U_2 I_2 = 10\times 1\mathrm{W} = 10\mathrm{W} > 0$

则元件2吸收功率，是负载。

元件3的电压和电流为非关联参考方向，故元件吸收功率

$P_3 = -U_3 I_1 = -(-4)\times 2\mathrm{W} = 8\mathrm{W} > 0$

则元件3吸收功率，是负载。

元件4的电压和电流非关联参考方向，故元件吸收功率

$P_4 = -U_2 I_4 = -10\times(-1)\ \mathrm{W} = 10\mathrm{W} > 0$

则元件4吸收功率，是负载。

1.4　电路的工作状态

电路在不同的条件下，会处于不同的运行状态，不同的状态具有不同的特点。

1.4.1　负载状态

将图 1.14 中的开关 S 闭合，负载与电源便处于接通状态，负载上就有电流通过，这时的电路工作在负载状态，又称有载工作状态。应用欧姆定律可求出电路中的电流为

$$I=\frac{E}{R_0+R} \tag{1-16}$$

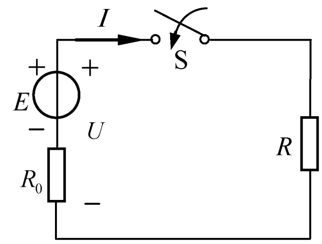


图 1.14　负载状态

负载电阻 R 两端的电压 $U=RI$，由此可得

$$U=E-R_0I \tag{1-17}$$

由上式可见，电源端电压小于电动势，两者之差为电流流过电源内阻所产生的电压降 R_0I。

例 1.2　已知图 1.15 所示电路中，R_1=50Ω，R_2=100Ω，R_3=200Ω，E=350V。求 R_1、R_2、R_3 各自消耗的电功率及电源产生的电功率。

解：由式（1.16）可求得电路中的电流

$$I=\frac{350}{50+100+200}\text{A}=1\text{A}$$

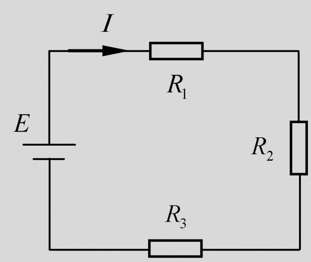


图 1.15　例 1.2 图

R_1 消耗的功率为

$$P_1=I^2\times 50\Omega=50\text{W}$$

R_2 消耗的功率为

$$P_2=I^2\times 100\Omega=100\text{W}$$

R_3 消耗的功率为

$$P_3=I^2\times 200\Omega=200\text{W}$$

由于电流的参考方向与电压源电压的参考极性是非关联参考方向，所以电源吸收功率为

$$P_{\text{S}}=-EI=-350\times 1\text{W}=-350\text{W}$$

电源吸收功率为负值，即电源实际是发出功率。由计算结果可知，电路中正负功率数值相等，符合能量守恒的规律。

电气设备的电压、电流、功率都有一个额定值，是考虑可靠性与使用寿命等因素而设定的。电气设备使用时，实际值等于额定值是最合理的。通常，当实际使用值等于额定值时，电气设备的工作状态称为额定状态；当实际电流或功率大于额定值时，电气设备工作在过载状态；当实际电流或功率小于额定值时，称电气设备工作在轻载或欠载状态。

1.4.2　空载状态

当图 1.14 中的开关 S 断开时，电路处于开路状态，又称空载状态。这时外电路相当于一个无穷大的电阻，电路中没有电流。电路断开处两端的电压等于电源电动势 E，称为开路电压 U_{OC}。由于电流为零，所以，电路中既不产生、也不消耗功率。电路的空载特征可归纳为

$$\left.\begin{aligned} &I = 0 \\ &U_{OC} = E \\ &P = 0 \end{aligned}\right\} \tag{1-18}$$

1.4.3　短路状态

当电源的两个输出端钮由于某种原因短接时，就造成了短路现象，如图 1.16 所示。在短路状态下，电流所通过的回路中，仅剩下很小的内阻 R_0，所以，电流将会达到很大的数值，该电流称为短路电流 I_{SC}。短路时，负载电流为零，电源电流达到最大值；电源端电压为零；电源发出的功率全部消耗在内阻上。电路的短路特征可表示如下

$$\left.\begin{aligned} &U = 0 \\ &I = I_{SC} = \frac{E}{R_0} \\ &P = R_0 I_{SC}^2 \end{aligned}\right\} \tag{1-19}$$

因为短路电流很大，并且将在内阻 R_0 上全部转换成热能，所以电源温度会迅速上升乃至烧坏电源。因此，短路是一种严重事故，应采取措施加以避免和防护。通常在电路中接入熔断器或自动断路器，可以在发生短路事故时，迅速切断故障电路，起到保护电源的作用。生产实践中，有时为了达到某种目的，可以人为地利用短路的特性。例如，电动机的启动电流很大，为了保护串联在电路中的电流表，可以用一个旁路开关在电动机启动前将电流表两端短路，使启动电流从旁路通过，待电动机启动后，再断开旁路线，恢复电流表的工作，如图 1.17 所示。

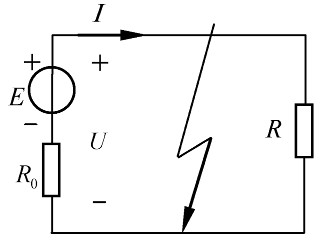


图1.16　短路状态

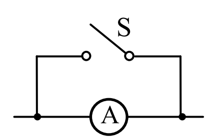


图1.17　电流表的旁路

例 1.3　一台直流发电机，额定功率 P_N=10kW，额定电压 U_N=220V，内阻 R_0=0.6Ω，发电机向并联负载供电，每个负载电阻 R=9.7Ω，如图 1.18 所示。试求：

（1）发电机的额定电流和电动势；

（2）当发电机分别向一个、二个、三个负载供电时，发电机的输出电流、输出电压和输出功率各为多少？

解：(1) 发电机的额定电流为

$$I_N = \frac{P_N}{U_N} = \frac{10 \times 10^3}{220} = 45.45\text{A}$$

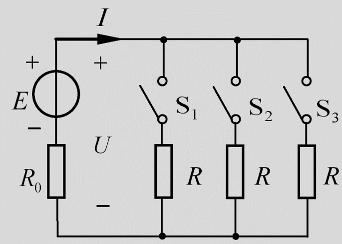


图 1.18　例 1.3 图

电动势 $E = U_N + I_N R_0 = 220 + 45.45 \times 0.6 = 247.27\text{V}$

(2) 当发电机向一个负载供电时，输出电流为

$$I = \frac{E}{R_0 + R} = \frac{247.27}{0.6 + 9.7} = 24.01\text{A} < I_N$$

输出电压为

$$U = E - IR_0 = 247.27 - 24.01 \times 0.6 = 232.86\text{V}$$

输出功率为

$$P = UI = 232.86 \times 24.01 = 5590.97\text{W} \approx 5.59\text{kW} < P_N$$

可见发电机的电流和功率均未达到额定值，工作于轻载状态。

当发电机向两个负载供电时

$$I = \frac{E}{R_0 + \frac{R}{2}} = \frac{247.27}{0.6 + \frac{9.7}{2}} = 45.37\text{A} \approx I_N$$

$$U = E - IR_0 = 247.27 - 45.37 \times 0.6 = 220.05\text{V}$$

$$P = UI = 220.05 \times 45.37\text{W} \approx 9.98\text{kW} \approx P_N$$

可以看出，发电机的电流和功率均达到额定值，工作于额定状态（或称满载状态）。

当发电机向三个负载供电时

$$I = \frac{E}{R_0 + \frac{R}{3}} = \frac{247.27}{0.6 + \frac{9.7}{3}} = 64.56\text{A} > I_N$$

$$U = E - IR_0 = 247.27 - 64.56 \times 0.6 = 208.53\text{V}$$

$$P = UI = 208.53 \times 64.56\text{W} \approx 13.5\text{kW} > P_N$$

显然，此时发电机的电流和功率均大大超过额定值，工作于过载状态。

例 1.4　实验中，测得某电源的开路电压为 24V，短路电流为 10A，求该电源的电动势和内阻；求当它外接负载为 2.4Ω 时供出的电流为多少？

解：电源开路电压等于电源电动势，即

$$U_{OC} = E = 24\text{V}$$

电源内阻为

$$R_0 = \frac{U_{OC}}{I_{SC}} = \frac{24}{10} = 2.4\Omega$$

外接负载为 2.4Ω 时电流为

$$I=\frac{U_{OC}}{R_0+R_L}=\frac{24}{2.4+2.4}=5A$$

1.5　基尔霍夫定律

1.5.1　电路相关名词

元件接入电路中，其电压和电流除了受元件特性的影响（即元件约束）外，元件的连接结构也会对其产生影响（即拓扑约束）。基尔霍夫定律就是描述电路拓扑约束关系的。电路的拓扑描述中经常用到支路、节点、回路、网孔等名词术语。

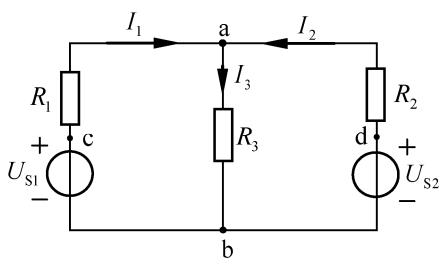


图 1.19　电路相关名词

电路中通过同一电流的每一个分支，称为支路。在图 1.19 中有三条支路：ab、acb 和 adb。

电路中三条或三条以上支路的连接点，称为节点。图 1.19 中有两个节点：a 和 b。

电路中任一闭合路径，称为回路。图 1.19 中共有三个回路：abca、adba、adbca。

内部不含有支路的回路，称为网孔。图 1.19 的三个回路中，abca 和 adba 是网孔，而 adbca 则不是网孔。

1.5.2　基尔霍夫电流定律（KCL）

基尔霍夫电流定律是关于电路中电流分布规律的基本定律，是电流连续性的表现。该定律表述为：任何时刻，流入电路任一节点的电流的代数和恒等于零，即

$$\sum i=0 \tag{1-20}$$

应用 KCL 时首先要指定每条支路电流的参考方向，而且要注意式（1-20）中的正负号。如果规定流入节点的电流为正号，则流出节点的电流取负号。例如，对于图 1.19 中的节点 a，应用 KCL 得到

$$I_1+I_2-I_3=0$$

或写成

$$I_1+I_2=I_3$$

如果流入某节点的电流之和为 $\sum i_{in}$，流出该节点的电流之和为 $\sum i_{out}$，则

$$\sum i_{in}=\sum i_{out} \tag{1-21}$$

所以，基尔霍夫定律也可描述成：任何时刻，流入任一节点的电流之和等于流出该节点的电流之和。

基尔霍夫电流定律是电路中连接到同一个节点的各支路电流必须遵守的约束，这一约束仅与电路的结构有关，而与各支路上的元件性质无关。

基尔霍夫电流定律不仅适用于节点，也适用于任一闭合面，即广义节点。例如，对

图 1.20 所示电路，有

$$I_A + I_B + I_C = 0$$

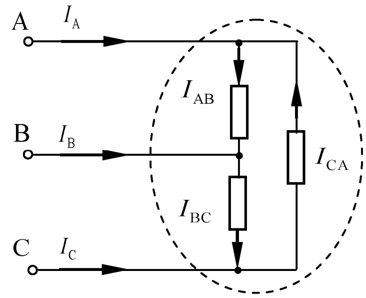


图 1.20　广义 KCL

例 1.5 在图 1.21 中，已知：I_1=2A，I_2=−3A，I_3=−2A，试求 I_4。

解：根据 KCL，$\sum I = 0$，以流入电流为正，则

$$I_1 - I_2 + I_3 - I_4 = 0$$

代入已知，即

$$2 - (-3) + (-2) - I_4 = 0$$

可得

$$I_4 = 3\text{A}$$

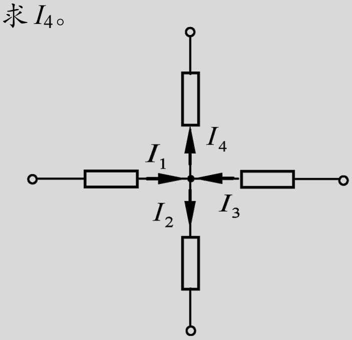


图 1.21　例 1.5 图

注意，KCL 方程中支路电流前的正负号取决于电流参考方向是流入节点还是流出节点；而电流值的正负号取决于实际方向与参考方向是否一致。

1.5.3　基尔霍夫电压定律（KVL）

基尔霍夫电压定律是关于电路中电压分配规律的基本定律。基尔霍夫电压定律可以描述成：任何时刻，沿任一闭合回路的所有电压的代数和恒等于零，即

$$\sum u = 0 \tag{1-22}$$

应用 KVL 时首先要指定回路的绕行方向。当电压参考方向与回路绕行方向一致时，该电压前的符号取“+”；当电压参考方向与回路绕行方向相反时，该电压前的符号取“−”。例如，对于图 1.19 所示电路，选定回路绕行方向为顺时针方向，则回路 abca 的 KVL 方程为

$$I_1R_1 + I_3R_3 - U_{S1} = 0$$

上式可写成

$$I_1R_1 + I_3R_3 = U_{S1}$$

等式左边是沿回路绕行方向的电压降，而等式右边是沿回路绕行方向的电压升。所以，

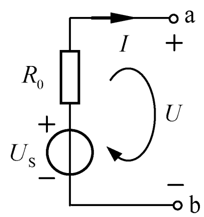


图 1.22　KVL 推广

基尔霍夫电压定律也可描述成：任何时刻，沿任一回路的电压降之和等于电压升之和。

基尔霍夫电压定律是电路中任一回路中各电压必须遵循的约束关系，这一约束也仅与电路的结构有关，而与元件性质无关。

基尔霍夫电压定律不仅应用于闭合回路，也可以推广应用于任一假想闭合回路，即广义回路。如图 1.22 所示电路，设 a、b 两点间的电压为 U，参考方向及回路绕行方向如图所示，则根据 KVL，可列出

$$IR_0 + U - U_S = 0$$

可得

$$U = U_S - IR_0$$

1.5.4　基尔霍夫定律的应用

例 1.6　在图 1.23 所示电路中，已知 E=2V，I_s=1A，R_1=3Ω，R_2= 1Ω。求各电阻消耗的功率及各电源产生的功率。

解：首先选定各元件的电压、电流的参考方向，如图 1.23 所示，则

$$U_2 = E = 2\text{V}$$

$$U_1 = R_1 I_S = 3\times 1 = 3\text{V}$$

$$I_2 = \frac{U_2}{R_2} = \frac{2}{1} = 2\text{A}$$

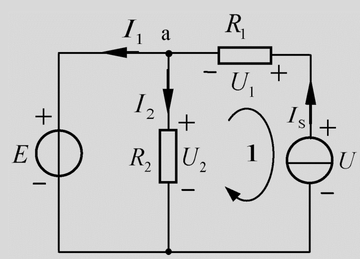


图 1.23　例 1.6 图

对节点 a，根据 KCL 得

$$I_1 = I_S - I_2 = 1 - 2 = -1\text{A}$$

对回路 1，根据 KVL 得

$$U = U_1 + U_2 = 3 + 2 = 5\text{V}$$

所以各电阻消耗的功率分别为

$$P_{R_1} = R_1 I_S^2 = 3\text{W}$$

$$P_{R_2} = R_2 I_2^2 = 4\text{W}$$

各电源产生的功率分别为

$$P_E = -I_1 E = -(-1)\times 2 = 2\text{W}$$

$$P_{I_S} = I_S U = 1\times 5 = 5\text{W}$$

例 1.7 图 1.24 所示电路，求电流 I。

解：直接对虚线所示广义节点应用 KCL，有

$$3+2+8-2-I=0$$

由此可得

$$I=11\text{A}$$

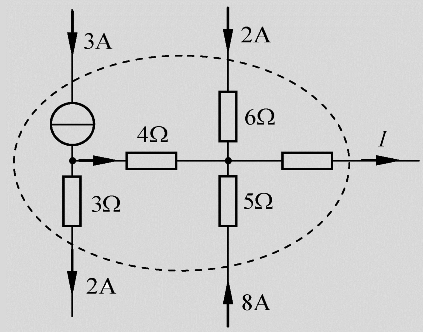


图 1.24　例 1.7 图

1.6 应 用 举 例

例 1.8 人体电路分析。

生活中常见“高压危险”的警示，似乎是否造成伤害及伤害程度完全取决于电压的大小。事实上，电击对人体的危害程度，主要取决于通过人体电流的大小和通电时间长短。在有防触电保护装置的情况下，人体允许通过的电流（安全电流）一般按 30mA 考虑。当人体作为电流的导体时，其头、颈、臂、腿和躯干分别等效为不同大小的电阻，人体电路模型如图 1.25 所示。

假设某电力设备的电源电压为 220V，并假设人体躯干电阻为 200Ω，头颈电阻为 300Ω，臂电阻 600Ω，腿电阻为 400Ω。

该电力设备是否需要设置安全警示？假设某人头部接触电源正极，则相当于在该人体头与脚之间加入 220V 电压，其间电阻为 900Ω；若该人两手分别接触电源正负极，则相当于在该人体两手之间加入 220V 电压，其间电阻为 1200Ω；若该人单手接触电源正极，则相当于在该人体手及脚之间加入 220V 电压，其间电阻为 1200Ω。可见只需考虑电阻最大时电流是否超过安全电流即可。但是，在通常情况下，人体单手接触电源正极的可能性最大。在实际工程中，也是按此确定安全标志的。故此时流过人体的电流为

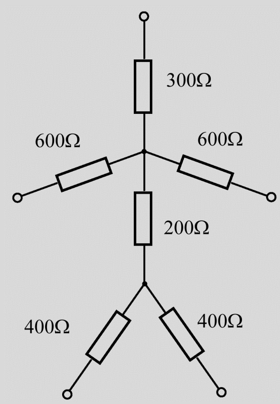


图 1.25　人体电路模型

$$I=U/R=220/1200\approx183\text{mA}$$

该电流超过人体安全电流，应设置安全警示。

例 1.9 汽车仪表盘照明电路。

如图 1.26 所示为汽车仪表盘前灯的照明电路，电路采用 12V 蓄电池（电压源）供电；变阻器 R 为电位器，可通过仪表盘上的旋钮调节，以控制通过灯泡电流的大小，进而控制光线的强弱；熔丝（熔断器）起到保护电路的作用，防止因短路或其他原因导致电流过大而损坏电路。

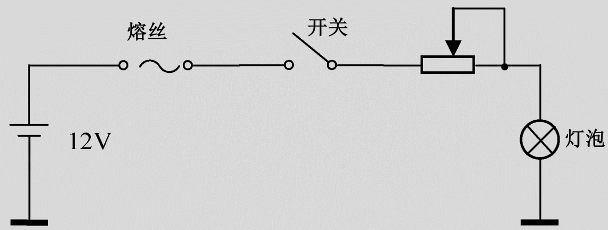


图 1.26　汽车仪表盘前灯照明电路

例 1.10　摩托车照明灯电路。

摩托车照明系统由前灯、尾灯、转向灯、把手开关和蓄电池组成。照明电路中，L_1 为前大灯，L_2 为尾灯，L_3 为转向灯。S_1 开关控制 L_1、L_2 两盏灯，S_2 开关控制 L_3 一盏灯，电源 E 为 12V，内阻为 51Ω，转向灯应为左右两盏灯，用组合开关控制，在此为了简单起见，转向灯只保留了一盏灯和一个开关。晚上开车时，闭合开关 S_1，前大灯和尾灯都亮。

按照图 1.27 所示电路图组建电路。考虑一个开关闭合和两个开关闭合的两种情况下，哪种情况电源电流大?

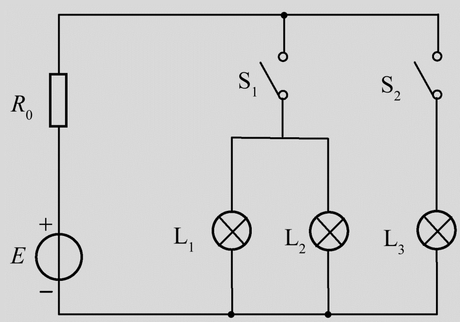


图 1.27　摩托车照明灯电路

解：两个开关闭合情况下，前灯、尾灯、转向灯都亮，且三个灯并联关系，线路电阻相对较小，所以通过电源的电流相对大一些。

例 1.11　一只标有“220V、100W”的白炽灯泡（即当这只灯泡外加 220V 电压时，它消耗的功率为 100W。100W 即为标称功率），接在 220V 电源上。试求:

（1）通过灯泡的电流;

（2）灯泡点燃时的灯丝电阻值;

（3）如果该灯泡接在 200V 的电压上，它的实际功率是多少;

（4）如果灯泡接在 110V 的电压上，此时它消耗的电功率又是多少?

解：（1）$I=\dfrac{P}{U}=\dfrac{100}{220}\approx 0.454\text{A}$

（2）$R=\dfrac{U}{I}=\dfrac{220}{0.454}\approx 484\Omega$ 或 $R=\dfrac{U^2}{P}=\dfrac{220^2}{100}\approx 484\Omega$

（3）$P=\dfrac{U^2}{R}=\dfrac{200^2}{484}=82.6\text{W}$

（4）$P=\dfrac{U^2}{R}=\dfrac{110^2}{484}\approx 25\text{W}$

灯泡上标注的功率是生产过程中要求产品在正常工作条件下实际消耗的功率，是灯泡安全工作时允许消耗的最大功率。当实际工作状态符合产品额定工作条件时，它消耗的功率应当是标志的额定值，当工作条件变化时，它实际消耗的功率也随之改变。

例 1.12 家用电饭锅的加热及保温原理如图 1.28 所示。当加热开关 AM 闭合时，R_2 短接，加热电阻为 R_1，当锅内饭煮干，温度升高到 103℃时加热开关跳开，总电阻变为 R_1+R_2。设电饭锅额定功率为 500W，保温时功率为 40W，试计算 R_1 和 R_2。

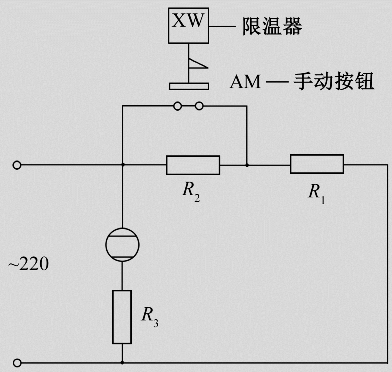


图 1.28　电饭锅电原理图

解：$R_1=\dfrac{U^2}{P}=\dfrac{220^2}{500}=96.8\Omega$

$R_1+R_2=\dfrac{U^2}{P'}=\dfrac{220^2}{40}=1210\Omega$

$R_2=1113.2\Omega$

本 章 小 结

1．电路是电流的通路，由电源、负载和中间环节三部分组成。电路的作用是实现电能的传输和转换以及信号的传递和处理。

2．电流和电压的参考方向都是人为规定的。在规定了参考方向的情况下，电量均是代数值。参考方向和实际方向一致时是正值，反之为负值。在未规定参考方向的情况下，各电量的正、负值是没有意义的。当电压与电流的参考方向是关联参考方向时，根据功率的正负可以判断该元件是发出能量还是消耗能量，即是起电源作用还是起负载作用。

3．电路有三种工作状态

（1）负载状态。

$$I=\frac{E}{R_0+R}$$
$$U=E-R_0 I$$
$$P=UI$$

（2）空载状态。

$$I=0$$
$$U_{OC}=E$$
$$P=0$$

（3）短路状态。

$$I_{SC}=\frac{E}{R_0}$$
$$U=0$$

$$P = R_0 I_{SC}^2$$

4．基尔霍夫电流定律（KCL）表明了电路中任一节点所关联的各支路电流之间的约束关系，即对任一节点有

$$\sum i = 0$$

基尔霍夫电压定律（KVL）表明了电路的任一回路中每段电路的电压之间约束关系，即对任一回路有

$$\sum u = 0$$

基尔霍夫定律和欧姆定律是分析电路的基本定律和理论基础。

习　题　1

1.1　填空题

（1）电路由__________、__________、__________三部分组成。

（2）在非关联参考方向下，电阻 R 为 1kΩ，电压为 2V，电流为_______A。

（3）阻值为 100Ω，额定功率为 0.25W 的电阻器，所允许的工作电流为 I =______A，工作电压为 U=_____V。

（4）判别一个元件是吸收功率还是发出功率，可根据 U、I 的参考方向和 P 的数值来判别，在 U、I 的关联参考方向下，若 $P<0$，则元件________功率；若 $P>0$，则元件________功率。

（5）某元件上的电压和电流参考方向一致称两参考方向为_________。

（6）对于理想电压源而言，不允许_________路。

（7）电压源对外提供电压，电流取决于_________。

（8）对于理想电流源而言，不允许_________路。

（9）电流源对外提供电流，电压取决于_________。

1.2　判断题

（1）电流和电压的参考方向是任意设定的。（　　）

（2）电流的参考方向就是电流的实际方向。（　　）

（3）设元件电流的参考方向时，必须依赖其电压的参考方向。（　　）

（4）某元件在电压和电流关联参考方向情况下计算所得功率为−10W，则该元件起电源作用。（　　）

（5）电路分析中一个电流得负值，说明它小于零。（　　）

（6）应用基尔霍夫定律列写方程式时，可以不参照参考方向。（　　）

（7）电流由元件的低电位端流向高电位端的参考方向称为关联参考方向。（　　）

（8）电流的参考方向规定为正电荷的运动方向。（　　）

1.3　选择题

（1）在图 1.29 中，负载增加是指（　　）。

A．负载电阻 R 增大　B．负载电流 I 增大

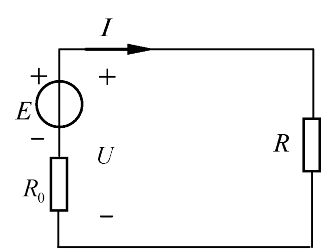


图 1.29　习题 1.3（1）图

C．电源端电压 U 增高

（2）用一只额定值为110V、100W的白炽灯和一只额定值为110V、40W的白炽灯串联后接到220V的电源上，当将开关闭合时，（　　）。

A．能正常工作　B．100W 的灯丝烧毁　C．40W 的灯丝烧毁

（3）有一 220V、1000W 的电炉，今欲接在 380V 的电源上，可串联的变阻器是（　　）。

A．100Ω　3A　　B．50Ω　5A　　C．30Ω　10A

（4）在图 1.30 中，电压和电流的关系式为（　　）。

A．$U=E-RI$　　B．$U=E+RI$　　C，$U=-E+RI$

1.4　在图 1.31 所示的两个电路中，要在 12V 的直流电源上使额定电压 6V、额定电流 50mA 的小灯泡正常发光，应该采用哪一个？

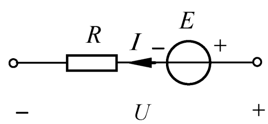
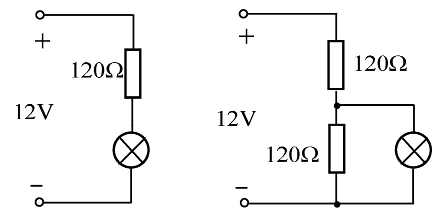


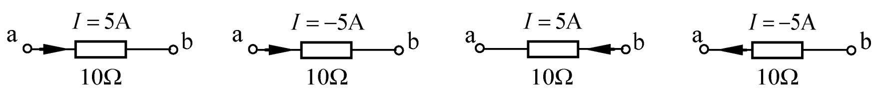
图 1.30　习题 1.3（4）图



(a)　(b)

图 1.31　习题 1.4 图

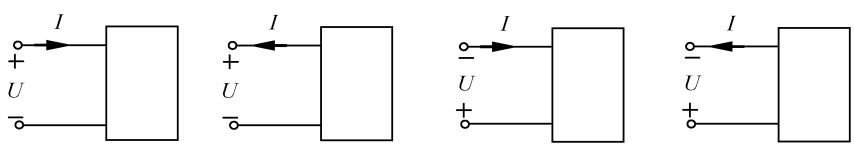
1.5　求图 1.32 所示的电压 U_{ab} 。



(a)　(b)　(c)　(d)

图 1.32　习题 1.5 图

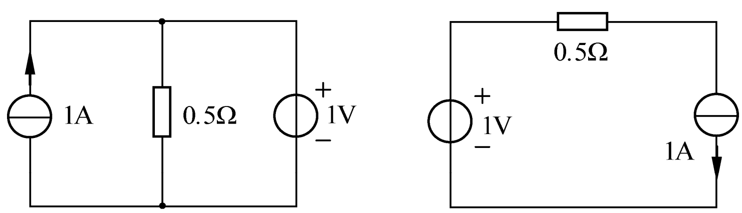
1.6　在图 1.33 中，方框代表电源或负载。已知 U=220V，I=−1A，试问哪些方框是电源？哪些方框是负载？



(a)　(b)　(c)　(d)

图 1.33　习题 1.6 图

1.7　求图 1.34 所示两电路中电阻的电压和电流，以及图 1.34（a）中电流源的电压和图 1.34（b）中电压源的电流。



（a）电路 1　　（b）电路 2

图 1.34　习题 1.7 图

1.8　求图 1.35 所示电路中通过电压源的电流 I_1、I_2 及其功率，并说明两电压源是起电源作用还是负载作用。

1.9　图 1.36 中，U_{ab}=2V，E_1=4V，E_2=−8V，R=2Ω，求电流 I 并计算这一段电路的功率及各元件的功率。

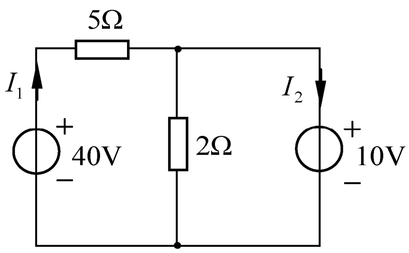


图 1.35　习题 1.8 图

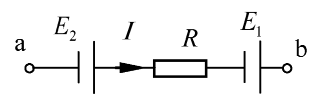


图 1.36　习题 1.9 图

1.10　图 1.37 中，E_1=10V、E_2=5V、R_1=6Ω、R_2=3Ω、I_3=4，求 I_1 及 I_2。

1.11　图 1.38 中，I_1=0.5A、I_2=1A、I_3=−2A，求 I_4。

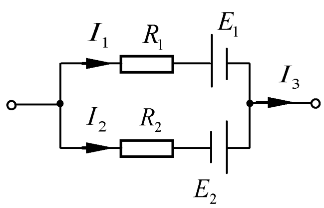


图1.37　习题1.10图

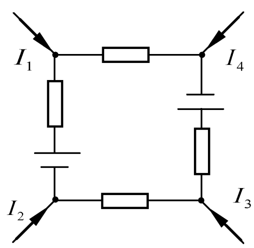


图1.38　习题1.11图

1.12　图 1.39 所示电路，已知 U_S＝3V，I_S＝2A，求 U_{AB} 和 I。

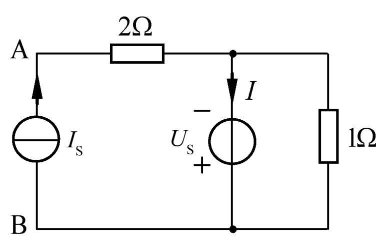


图 1.39　习题 1.12 图

第 2 章　电路的基本分析方法

本章以电阻电路为例介绍电路分析的基本方法，其中包括支路电流法、叠加原理和戴维南定理。这些方法虽然是基于直流电路论述的，但同样适用于交流电路的分析与计算，同时也是分析电子电路的重要基础。

2.1　电阻的串联、并联与混联

2.1.1　电阻的串联

多个电路元件依次首尾连接，中间没有分支，在电源的作用下，电流只有一条通路，这种连接方式叫作串联。图 2.1（a）表示三个电阻串联后，由一个电源供电的电路。

在这个串联电路中，通过各电阻的电流是同一个电流 I，每个电阻上的电压可以根据欧姆定律进行计算，即

$$\begin{aligned} U_1 &= R_1 I \\ U_2 &= R_2 I \\ U_3 &= R_3 I \end{aligned} \tag{2-1}$$

由基尔霍夫电压定律可知：串联电阻两端的电压等于各个电阻上电压的和，即

$$U = U_1 + U_2 + U_3 = R_1 I + R_2 I + R_3 I = (R_1 + R_2 + R_3)I \tag{2-2}$$

$$R = R_1 + R_2 + R_3 \tag{2-3}$$

$$U = RI \tag{2-4}$$

于是，可以根据式（2-4），画出如图 2.1（b）所示的电路。由于图中所示的两个电路，电压 U 和电流 I 完全相同，所以，从电路的外部端钮 a、b 看来，一个电阻 R 和三个串联的电阻 R_1、R_2、R_3，效果是相同的。所以，把电阻 R 称为三个串联电阻的等效电阻。

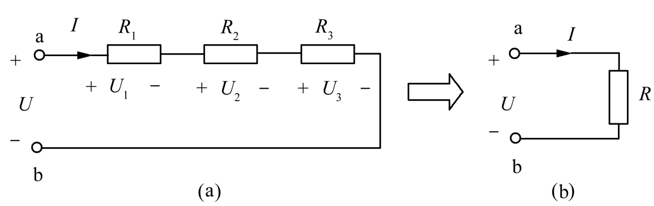


图 2.1　电阻的串联

由式（2-1）和式（2-4）可知

$$\frac{U_1}{R_1} = \frac{U_2}{R_2} = \frac{U_3}{R_3} = \frac{U}{R} = I$$

所以有

$$U_1 = \frac{R_1}{R}U$$
$$U_2 = \frac{R_2}{R}U \qquad (2\text{-}5)$$
$$U_3 = \frac{R_3}{R}U$$

式（2-5）称为串联电阻电路的分压公式。显然，$U_1 : U_2 : U_3 = R_1 : R_2 : R_3$，即串联电阻电路中，各电阻的电压与电阻的大小成正比，而$\frac{R_1}{R}$、$\frac{R_2}{R}$、$\frac{R_3}{R}$是分压比。

各电阻消耗的功率为

$$P_1 = I^2 R_1 = U_1 I$$
$$P_2 = I^2 R_2 = U_2 I$$
$$P_3 = I^2 R_3 = U_3 I$$

所以有

$$P_1 : P_2 : P_3 = R_1 : R_2 : R_3$$

因为

$$U = U_1 + U_2 + U_3$$

两边都乘以电流 I，可以得到

$$P = P_1 + P_2 + P_3$$

对于 n 个电阻串联的情况，等效电阻为

$$R = \sum_{k=1}^{n} R_k \qquad (2\text{-}6)$$

分压公式为

$$U_i = \frac{R_i}{R}U \qquad (2\text{-}7)$$

式中，U_i 是第 i 个电阻的电压。

例 2.1 图 2.2 所示分压器电路中，从 R_2 两端取出所需要的电压。设 U_i=50V，要求输出电压 U_2=12V，且 R_1+R_2=5kΩ，求 R_1 及 R_2。

解：由分压公式

$$U_2 = \frac{R_2}{R_1 + R2}\ U_i$$

代入已知数据

$12 = \frac{R_2}{5} \times 50$，可得到

R_2=1.2kΩ

所以

R_1=5−1.2=3.8kΩ

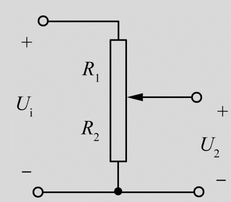


图 2.2　分压器

2.1.2　电阻的并联

多个电路元件，一端连接在一个公共点，另一端连接在另一个公共点，在电源的作用下，所有元件两端的电压都相同，这种连接方式叫作并联。图2.3（a）所示是三个电阻并联后，由一个电源供电。在这个电路中，加在各个电阻上的电压是同一个电压U。电阻R_1、R_2、R_3中的电流分别为

$$I_1 = \frac{U}{R_1}$$
$$I_2 = \frac{U}{R_2} \qquad (2\text{-}8)$$
$$I_3 = \frac{U}{R_3}$$

根据基尔霍夫电流定律（KCL），电流I等于各并联电阻中电流之和，即

$$I = I_1 + I_2 + I_3 = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \frac{U}{R_3} = (\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3})U \qquad (2\text{-}9)$$

如果令

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \qquad (2\text{-}10)$$

则有

$$I = \frac{U}{R} \qquad (2\text{-}11)$$

可见，几个电阻并联时，等效电阻的倒数等于各并联电阻倒数之和。当用等效电阻R代替三个并联电阻R_1、R_2、R_3时，可以把图2.3（a）所示的电路简化成图2.3（b）的形式。

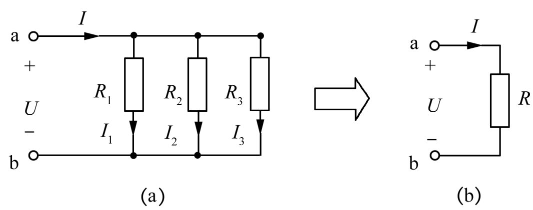


图 2.3　电阻的并联

由式（2-8）和式（2-11）可知

$$\frac{I_1}{I} = \frac{R}{R_1}$$

$$\frac{I_2}{I} = \frac{R}{R_2}$$

$$\frac{I_3}{I} = \frac{R}{R_3}$$

所以

$$I_1 = \frac{R}{R_1} I$$

$$I_2 = \frac{R}{R_2} I \qquad (2\text{-}12)$$

$$I_3 = \frac{R}{R_3} I$$

这就是并联电阻电路的分流公式。因为等效电阻R小于电阻R_1、R_2、R_3，所以通过三个电阻的电流I_1、I_2、I_3均小于电流I，$\frac{R}{R_1}$、$\frac{R}{R_2}$、$\frac{R}{R_3}$称为分流比。可见，在并联电路中，电阻越大，分配其上的电流越小；电阻越小，分配其上的电流越大。从式（2-12）可得到

$$I_1 : I_2 : I_3 = \frac{1}{R_1} : \frac{1}{R_2} : \frac{1}{R_3}$$

当两个电阻并联时，分流公式可写为

$$I_1 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} I$$

$$I_2 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} I \qquad (2\text{-}13)$$

图2.3（a）中R_1、R_2、R_3 三个电阻消耗的功率为

$$P_1 = UI_1 = \frac{U^2}{R_1}$$

$$P_2 = UI_2 = \frac{U^2}{R_2}$$

$$P_3 = UI_3 = \frac{U^2}{R_3}$$

所以有

$$P_1 : P_2 : P_3 = \frac{1}{R_1} : \frac{1}{R_2} : \frac{1}{R_3}$$

可见电阻并联时，各电阻消耗的功率与电阻值成反比。等效电阻R消耗的功率为

$$P = UI = U(I_1 + I_2 + I_3) = P_1 + P_2 + P_3$$

即等效电阻消耗的功率等于各并联电阻消耗功率的总和。

如果有n个电阻并联，等效电阻为

$$R = \frac{1}{\sum_{k=1}^{n} \frac{1}{R_k}} \qquad (2\text{-}14)$$

则分流公式为

$$I_i = \frac{R}{R_i} I \qquad (2\text{-}15)$$

式中，R_i为第i个电阻，I_i为第i个电阻中的电流。

例 2.2 设有三对并联电阻，其电阻值分别为：（1）R_1=240Ω、R_2=560Ω；（2）R_1=560Ω、R_2=560Ω；（3）R_1=1Ω、R_2=560Ω。试求每对并联电阻的等效值。

解：（1）等效电阻为

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{240 \times 560}{240 + 560}\Omega = 168\Omega$$

（2）等效电阻为

$$R = \frac{560 \times 560}{560 + 560}\Omega = 280\Omega$$

（3）等效电阻为

$$R = \frac{1 \times 560}{1 + 560}\Omega = 0.9982\Omega \approx 1\Omega$$

从计算结果可知：等效电阻一定小于并联电阻中最小的电阻；如果两个并联电阻大小相等，则等效电阻是每个并联电阻的 1/2；当两个并联电阻大小相差悬殊时（$R_1 << R_2$），可以认为等效电阻约等于小电阻。

2.1.3　电阻的混联

电路中既有元件的串联，又有元件的并联，这种连接方式叫作混联或串并联的组合。对于电阻的混联电路，仍然可以用已经介绍过的串联和并联电路的分析方法，把它简化成一个等效电阻。所以，电阻的混联电路仍属于简单电路。

例 2.3 图 2.4 所示电路中，试求：

（1）a、b 两端的等效电阻；

（2）c、d 两端的等效电阻。

解：（1）计算 R_{ab}。先求并联部分的等效电阻 R_{db} 为

$$R_{db} = \frac{30 \times 60}{30 + 60}\Omega = 20\Omega$$

再计算 R_{cb}

$$R_{cb} = \frac{100 \times (80 + 20)}{100 + (80 + 20)}\Omega = 50\Omega$$

所以

$$R_{ab} = 50 + 50 = 100\Omega$$

（2）计算 R_{cd}。从 c、d 两端看，50Ω的电阻已经不在电路中，如图 2.5 所示，可得

$$R_{cd} = \frac{80 \times (100 + 20)}{80 + (100 + 20)}\Omega = 48\Omega$$

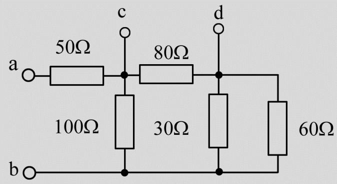


图 2.4　例 2.3 图

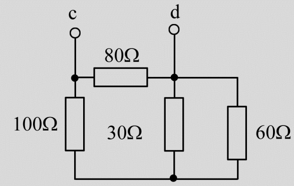


图 2.5　求 R_{cd} 电阻

例 2.4　图 2.6 所示电路中，如果 10Ω电阻两端的电压为 36V，求电阻 R 的值。

解：通过 10Ω电阻的电流为

$$I=\frac{36}{10}\text{A}=3.6\text{A}$$

15Ω　电阻两端的电压为

$$U_1=15\times3.6\text{V}=54\text{V}$$

5Ω　电阻两端的电压为

$$U_2=120-54-36=30\text{V}$$

通过 5Ω电阻的电流为

$$I_2=\frac{30}{5}\text{A}=6\text{A}$$

通过电阻 R 的电流为

$$I_1=I_2-I=6-3.6=2.4\text{A}$$

由欧姆定律可求得

$$R=\frac{U_\text{R}}{I_1}=\frac{54+36}{2.4}\Omega=37.5\,\Omega$$

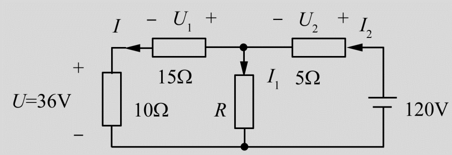


图 2.6　例 2.4 图

2.2　支路电流法

支路电流法是求解复杂电路的最基本方法，它以支路电流为未知量，根据基尔霍夫定律对节点和回路列写与支路电流数相等的方程式，然后求出各支路电流。

以图 2.7 为例，设三条支路电流分别为 I_1、I_2 和 I_3，其参考方向如图所示。首先，运用 KCL 定律对节点 a 和 b 列出电流方程为

$$I_1+I_2=I_3\text{（节点 a）}\tag{2-16}$$

$$I_3=I_1+I_2\text{（节点 b）}\tag{2-17}$$

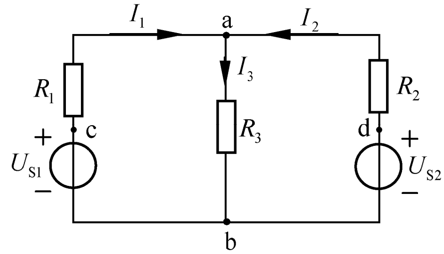


图 2.7　支路电流法

事实上，这两个方程是一样的。这说明，对于两个节点的电路，只能列一个独立节点电流方程。一般来说，当电路有 n 个节点时，独立的节点电流方程只有 n-1 个。

要求出三个支路电流，必须有三个方程式，

两个节点只能列一个独立的方程式，因此还需要运用 KVL 列出两个回路电压方程。图 2.7 所示电路中，共有三个回路。以顺时针为回路绕行方向，它们的回路电压方程分别为

$$I_1R_1 + I_3R_3 - U_{S1} = 0 \text{（回路 abca）} \tag{2-18}$$

$$-I_2R_2 - I_3R_3 + U_{S2} = 0 \text{（回路 abda）} \tag{2-19}$$

$$I_1R_1 - I_2R_2 + U_{S2} - U_{S1} = 0 \text{（回路 adbca）} \tag{2-20}$$

显然，上述三个方程也不是独立的，第三个方程可以通过前两个方程相加求得，因此只有两个独立回路电压方程。对于平面电路，选取网孔作为回路列写 KVL 方程，可以保证方程的独立性。

将式（2-16）、式（2-18）、式（2-19）联立求解，即可求出三个支路电流 I_1、I_2 和 I_3。

综上，对具有 l 条支路、n 个节点的电路，应用支路电流法求解电路的步骤可总结如下：

① 选定各支路电流的参考方向；

② 根据 KCL 对 $n-1$ 个节点列写节点电流方程；

③ 选定网孔绕行方向，对 $l-(n-1)$ 个网孔列写 KVL 方程；

④ 联立方程求解各支路电流。

例 2.5　图 2.7 所示的电路中，已知 R_1=20Ω，R_2=5Ω，R_3=6Ω，U_{S1}=140V，U_{S2}=90V。求各支路电流和电源的功率。

解：应用支路电流法，列出方程式（2-16）、式（2-18）和式（2-19），将已知条件代入并整理，可得方程组

$$\begin{cases} I_1 + I_2 = I_3 \\ 20I_1 + 6I_3 = 140 \\ 5I_2 + 6I_3 = 90 \end{cases} \tag{2-21}$$

求解可得各支路电流为

$I_1 = 4\text{A}$

$I_2 = 6\text{A}$

$I_3 = 10\text{A}$

电源 U_{S1} 的电压、电流属于非关联参考方向，所以其吸收功率为

$$P_1 = -U_{S1}I_1 = -140 \times 4\text{W} = -560\text{W}$$

实际发出功率 560W。

电源 U_{S2} 的电压、电流亦属于非关联参考方向，所以其吸收功率为

$$P_2 = -U_{S2}I_2 = -90 \times 6\text{W} = -540\text{W}$$

实际发出功率 540W。

例 2.6　用支路电流法求图 2.8 所示电路各支路电流及电流源两端电压。

解：各支路电流参考方向如图所示。根据电流源的性质可知，$I_2 = 5\text{A}$。

节点 a 的 KCL 方程为

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0 \qquad (2\text{-}22)$$

设网孔绕行方向为顺时针方向。对两个网孔分别列 KVL 方程，分别为

$$6I_1 + U = 10 \text{（网孔 1）} \qquad (2\text{-}23)$$

$$4I_3 - U = 0 \text{（网孔 2）} \qquad (2\text{-}24)$$

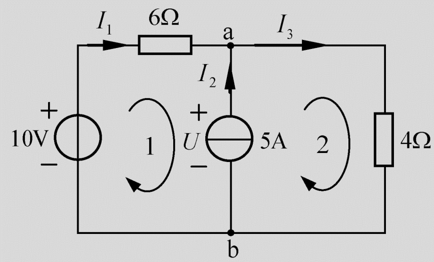


图 2.8　例 2.6 图

由此可得方程组

$$\begin{cases} I_1 - I_3 = -5 \\ 6I_1 + U = 10 \\ 4I_3 - U = 0 \end{cases} \qquad (2\text{-}25)$$

求解可得

$I_1 = -1\text{A}$

$I_2 = 5\text{A}$

$I_3 = 4\text{A}$

电流源端电压为

$U = 16\text{V}$

支路电流法在理论上可以用于求解各种复杂电路问题，其优点是简洁直观，但方程数较多。若手工求解方程，该方法一般只适用于支路数较少的电路。在支路数较多的情况下，用支路电流法求解就显得很烦琐，有必要探讨采用其他更适合的方法。

2.3　叠加原理

叠加原理是反映线性电路的本质特性——可叠加性的基本原理。一个线性电路总是用一组线性方程来表示的，线性方程的可叠加性就是线性电路本质特性的反映。

在图 2.9（a）所示电路中，已知U_S、I_S、R_1、R_2，可以利用支路电流法求解电流I_1、I_2。设电流源I_S的端电压为 U，则有

$$I_1 + I_S - I_2 = 0 \qquad (2\text{-}26)$$

$$R_1 I_1 + U - U_S = 0 \qquad (2\text{-}27)$$

$$U = I_2 R_2 \qquad (2\text{-}28)$$

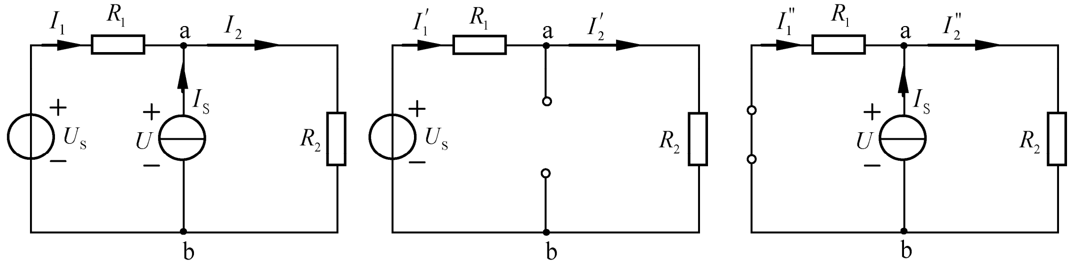
将式（2-28）代入式（2-27）得

$$R_1 I_1 + R_2 I_2 = U_S \qquad (2\text{-}29)$$

求解式（2-26）和式（2-29）组成的方程组，可得

$$I_1 = \frac{U_S}{R_1 + R_2} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} I_S = I_1' + I_1'' \qquad (2\text{-}30)$$

$$I_2 = \frac{U_S}{R_1 + R_2} + \frac{R_1}{R_1 + R_2} I_S = I_2' + I_2'' \qquad (2\text{-}31)$$



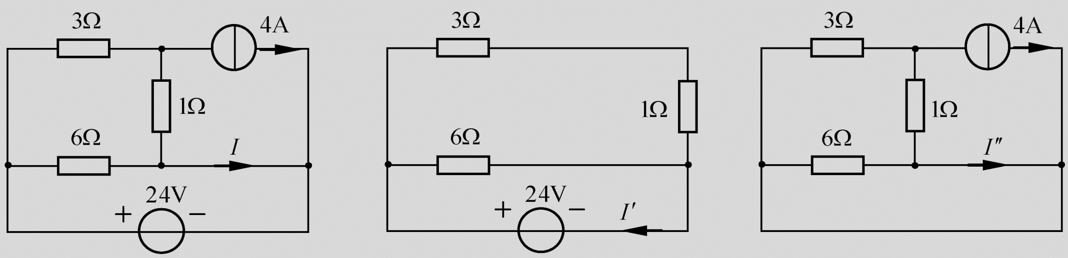
（a）完整电路　　（b）电压源单独作用　　（c）电流源单独作用

图 2.9　叠加原理示意图

结合图 2.9（b）和（c）可知，I_1' 和 I_2' 是理想电压源 U_S 单独作用时产生的电流，而 I_1'' 和 I_2'' 是理想电流源 I_S 单独作用时产生的电流。这说明，支路的电流（或电压）可以是每个电源单独作用结果的叠加。这就是叠加原理。

叠加原理是线性电路的一个重要原理，其内容叙述为：在具有多个独立电源同时作用的线性电路中，任一支路的电流或电压，都可以看成是每一个电源单独作用时，在该支路产生的电流或电压的代数和。运用叠加原理进行计算，可把原本复杂的电路分解为每一个电源单独作用的简单电路，从而使得计算变得方便些。

例 2.7　用叠加原理求图 2.10（a）所示电路中的电流 I。



(a) 完整电路　　（b）电压源单独作用　　（c）电流源单独作用

图 2.10　例 2.7 图

解：24V 电压源单独作用时，4A 电流源断路，等效电路如图 2.10（b）所示。此时电流为

$$I' = \frac{24}{(3+1)//6} = 10\text{A}$$

4A 电流源单独作用时，24V 电压源短路，等效电路如图 2.10（c）所示。此时电流为

$$I'' = -\frac{3}{3+1} \times 4 = -3\text{A}$$

因此，所求支路电流 $I = I' + I'' = 7\text{A}$ 。

使用叠加原理时，要注意以下几点：

①叠加原理只适用于线性电路。

②某一电源单独作用时，应令其他电源不作用（即等于零值）。不作用的电压源相当于短路；不作用的电流源相当于开路。

③叠加原理只适用于电压和电流的计算，而不适用于功率计算，因为功率是电压或电流的二次函数，而非线性关系。在计算功率时，可先用叠加原理计算出总电流或总电压，然后再根据总电流、总电压来计算功率。

④叠加时要注意参考方向。当分量与总量的参考方向一致时，取正号；当分量与总量的参考方向相反时，取负号。

2.4　戴维南定理

分析工程实际电路时，通常只需研究某一支路的电压、电流或功率。对所研究的支路来说，电路的其余部分就成为一个有源二端网络。图 2.11 所示具有两个出线端钮或一个端口，并且内部含有电源的电路称为有源二端网络。在许多情况下，都可以把电路看成是一个负载和一个有源二端网络的组合。如图 2.12 所示电路，就可以看成是 1Ω的负载电阻跨接在以 a、b 为端口的有源二端网络上。

戴维南定理能将有源二端网络等效成一个电压源和电阻的串联支路，从而使电路的计算简化。

如果将图 2.12 所示电路的 1Ω负载电阻断开，就得到了图 2.13（a）所示以 a、b 为端口的有源二端网络。在有源二端网络内部电源的共同作用下，在端口 a、b 上将出现电压，这个电压称为线性有源二端网络的开路电压，用 U_{OC} 表示。如果把有源二端网络中全部电源均置于零，即把二端网络内部电压源用短路替代，电流源用开路替代，则得到图 2.13（b）所示无源二端网络。显然，该无源二端网络可用一个等效电阻来代替。当有源二端网络内部所有的电源停止作用时，从端口 a、b 看进去的等效电阻称为入端电阻，用 R_0 表示。

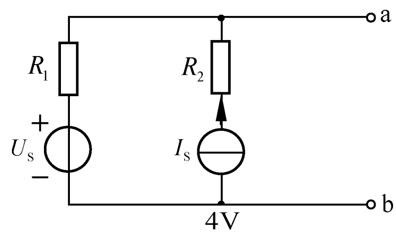


图 2.11　有源二端网络

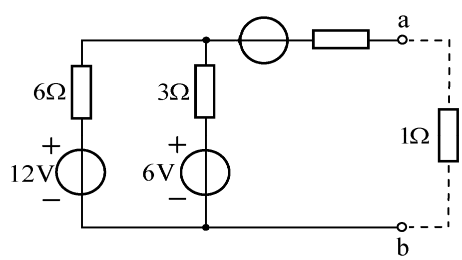


图 2.12　有源二端网络及其负载

设图 2.13（a）中 3Ω电阻两端电压的参考方向为上“+”下“−”，则可得到 3Ω电阻上的电压为

$$U_R = \frac{12-6}{9} \times 3 = 2V$$

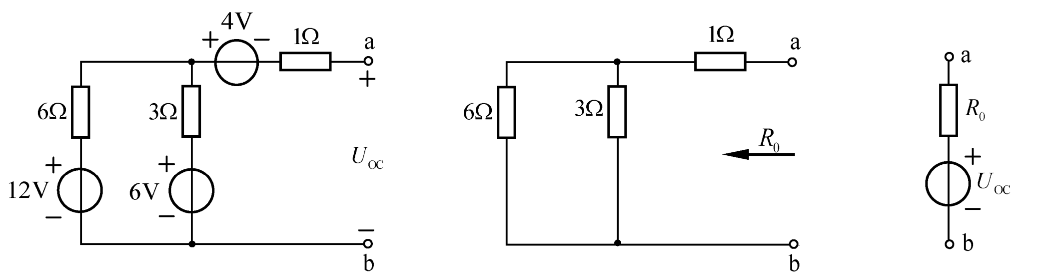
由此可得到二端网络的开路电压为

$$U_{OC} = -4 + 2 + 6 = 4V$$

由图 2.13（b）可得到该二端网络的入端电阻为

$$R_0 = 1 + \frac{3 \times 6}{3+6} = 3\Omega$$

开路电压 UOC 和入端电阻 R_0 串联组成的含源支路如图 2.13（c）所示。



（a）开路电压　　　　　　　　　　　（b）入端电阻　　　　　　　　　　　（c）等效含源支路

图 2.13　有源二端网络的等效

由图 2.13（a）所示有源二端网络的开路电压、入端电阻与图 2.13（c）所示简单含源支路的开路电压、入端电阻相同。如果两个有源二端网络的开路电压及入端电阻都相等，那么这两个有源二端网络就是互为等效的，它们的外特性是完全相同的。因此，图 2.13（a）所示有源二端网络可以用图 2.13（c）所示简单含源支路来等效替代。这是戴维南定理的基本思想。

戴维南定理指出，任何一个线性有源二端网络，对外电路来说，总可以用一个由理想电压源和电阻串联组成的等效含源支路来有效替代；理想电压源的电压等于该有源二端网络的开路电压，串联电阻等于该有源二端网络的入端电阻。

图 2.13（c）所示由一个电压源和一个电阻组成的串联支路，称为有源二端网络的戴维南等效电路。用戴维南等效电路将有源二端网络替代后，对外电路的求解没有影响。对于复杂电路中某一支路电流或电压的求取，采用戴维南定理通常比较简便易行。

例 2.8　图 2.14 所示电路，已知 U_S=15V，R_1=10Ω，R_2=10Ω，R_3=10Ω。求电流 I。

解：运用戴维南定理求解此题。

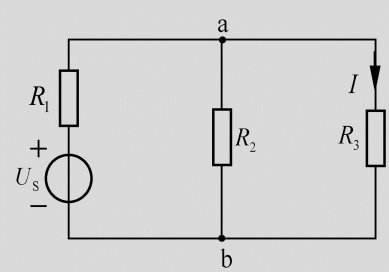


图 2.14　例 2.8 图

（1）求开路电压 U_{OC}。

将待求支路 R_3 从电路中断开，得到如图 2.15（a）所示有源二端网络，可求得有源二端网络的开路电压为

$$U_{OC}=\frac{U_S}{R_1+R_2}\times R_2=\frac{15}{10+10}\times 10=7.5\text{V}$$

（2）求入端电阻 R_0。

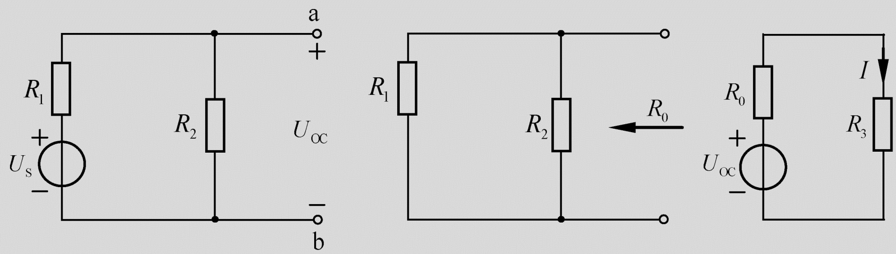
将图 2.15（a）所示有源二端网络内的电压源短路，得到图 2.15（b）所示无源二端网络。所以二端网络的入端电阻为

$$R_0=\frac{R_1R_2}{R_1+R_2}=\frac{10\times 10}{10+10}=5\Omega$$

（3）画出戴维南等效电路，如图 2.15（c）所示。则所求电流为

$$I=\frac{U_{OC}}{R_0+R_3}=\frac{7.5}{5+10}=0.5\text{A}$$

应用戴维南定理进行电路分析的关键是正确理解和求取开路电压 U_{OC} 和入端电阻 R_0。



（a）开路电压　　（b）入端电阻　　（c）等效电路

图 2.15　戴维南定理求解例 2.8

例 2.9　电路如图 2.16 所示，用戴维南定理求电压 U。

解：断开所求 6Ω电阻所在支路，得到如图 2.17（a）所示有源二端网络。

（1）求开路电压。由图 2.17（a）可得

$$U_{OC} = 3\times3+9 = 18\text{V}$$

（2）求入端电阻 R_0。将二端网络内电压源短路、电流源开路，得到如图 2.17（b）所示无源二端网络。所以

$R_0 = 3\Omega$（2Ω电阻和 4Ω电阻被短路）

（3）戴维南等效电路如图 2.17（c）所示。所以

$$U = \frac{6}{3+6}\times18 = 12\text{V}$$

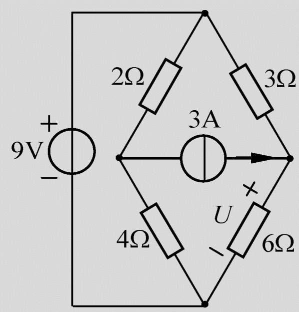
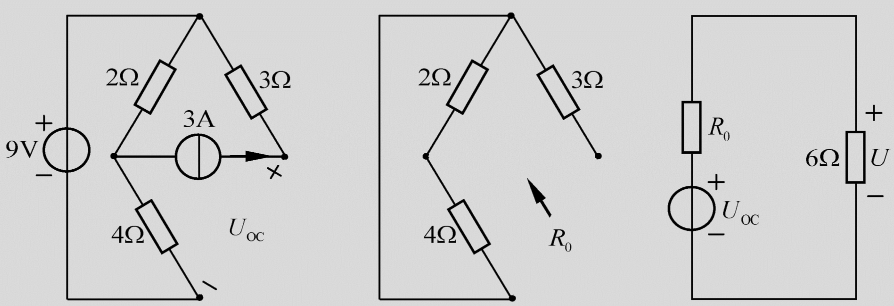


图 2.16　例 2.9 图



（a）开路电压　　（b）入端电阻　　（c）等效电路

图 2.17　戴维南定理求解例 2.9

例 2.10　在图 2.18（a）所示电路中，如果电阻 R 是可变的，求电阻 R 为何值时，其从电路中吸收的功率最大？该最大功率是多少？

解：首先将电阻 R 移去，求出余下二端网络的戴维南等效电路。

开路电压为

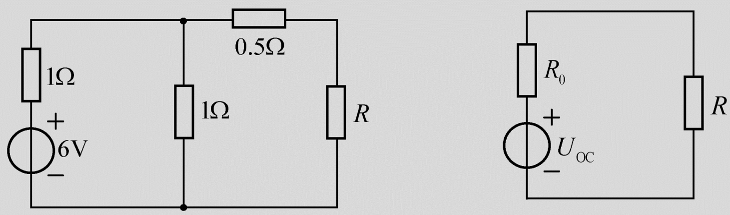
$$U_{OC} = \frac{1}{1+1}\times6 = 3\text{V}$$

入端电阻为

$R_0 = 0.5 + \frac{1\times1}{1+1} = 1\Omega$

所以可以得到如图 2.18（b）所示的戴维南等效电路。电阻 R 吸收的功率为

$$P_R = I^2R = \left(\frac{U_{OC}}{R_0+R}\right)^2 R = \frac{U_{OC}^2 R}{(R_0+R)^2}$$



（a）电路图　（b）等效电路

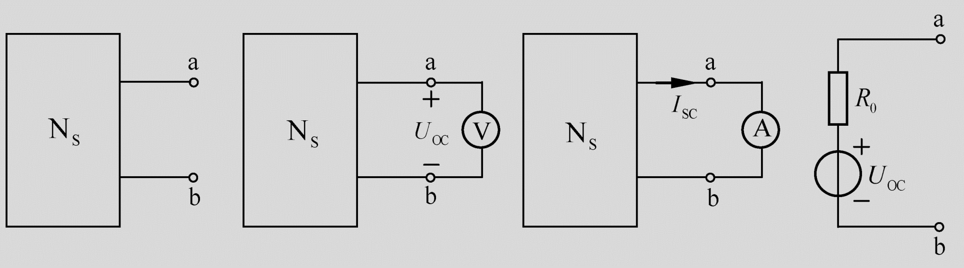
图 2.18　例 2.10 图

如果电阻 R 可变，则功率 P_R 的最大值发生在 $\frac{dP_R}{dR} = 0$ 的情况下，此时 $R = R_0$。所以，当 $R = 1\Omega$ 时，电阻 R 获得最大功率，最大功率为

$$P_{Rmax} = \frac{U_{OC}^2}{4R_0} = \frac{9}{4} = 2.25W$$

对于一个复杂的或内部参数及元件未知的有源二端网络，开路电压与入端电阻的直接计算可能难以实现，但可以通过实验方法获得其戴维南等效电路。

例 2.11　未知线性有源二端网络如图 2.19（a）所示，求其戴维南等效电路。



（a）未知网络　（b）开路电压　（c）短路电流　（d）等效电路

图 2.19　实验方法求取戴维南等效电路

解：（1）用电压表测量 a、b 间的电压，如图 2.19（b）所示，电压表的读数即为该二端网络开路电压 U_{OC}。

（2）用电流表测量 a、b 间的电流，如图 2.19（c）所示，电流表的读数即为该二端网络短路电流 I_{SC}。

（3）结合图 2.19（d）分析图 2.19（c）可知，线性有源二端网络的入端电阻为

$$R_0 = \frac{U_{OC}}{I_{SC}}$$

通过上述实验测量与计算，图 2.19（a）所对应的未知有源二端网络的戴维南等效电路图 2.19（d）即可得以确定。

2.5 应用举例

例 2.12 图 2.20 所示是万用表直流电压挡部分电路。表头满偏转电流 I_g=10μA，内阻 R_g=3500Ω，现在要改装成量程为 U_1=1V、U_2=2.5V、U_3=10V、U_4=50V、U_5=100V 的电压表，各挡共用一部分附加电阻，求各附加电阻的数值。

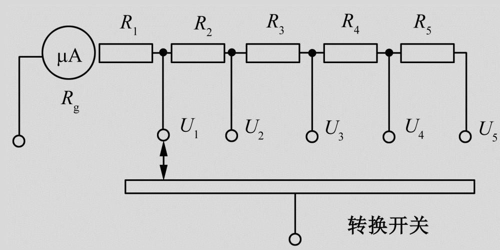


图 2.20　万用表直流电压挡部分电路

解：当表头满刻度指示时，两端电压是

$U_g=R_gI_g=3500\times10\times10^{-6}=0.035V$

即表头能测量的最大电压是 0.035V。

当满刻度量程电压是U_1=1V时，附加电阻R_1 上的电压为

$$U_{R_1} = U_1 - U_g = 1 - 0.035 = 0.965\ \text{V}$$

所以

$$R_1 = \frac{U_{R_1}}{I_g} = \frac{0.965}{10\times10^{-6}} = 96.5\text{k}\Omega$$

当满刻度量程电压是U_2=2.5V时，附加电阻R_2上的电压为

$$U_{R_2} = U_2 - U_1 = 2.5 - 1 = 1.5\ \text{V}$$

所以

$$R_2 = \frac{U_{R_2}}{I_g} = \frac{1.5}{10\times10^{-6}} = 150\text{k}\Omega$$

当满刻度量程电压是U_3=10V时，附加电阻R_3上的电压为

$$U_{R_3} = U_3 - U_2 = 10 - 2.5 = 7.5\ \text{V}$$

所以

$$R_3 = \frac{U_{R_3}}{I_g} = \frac{7.5}{10 \times 10^{-6}} = 750\text{k}\Omega$$

当满刻度量程电压是U_4=50V时，附加电阻R_4上的电压为

$$U_{R_4} = U_4 - U_3 = 50 - 10 = 40\ \text{V}$$

所以

$$R_4 = \frac{U_{R_4}}{I_g} = \frac{40}{10 \times 10^{-6}} = 4000\text{k}\Omega$$

当满刻度量程电压是U_5=100V时，附加电阻R_5上的电压为

$$U_{R_5} = U_5 - U_4 = 100 - 50 = 50\ \text{V}$$

所以

$$R_5 = \frac{U_{R_5}}{I_g} = \frac{50}{10 \times 10^{-6}} = 5000\text{k}\Omega$$

例2.13　图2.21所以是万用表分流电路。表头的参数为I_g=9.3μA、R_g=3760Ω，七个量程分别为I_1=10μA、I_2=50μA、I_3=100μA、I_4=1mA、I_5=10mA、I_6=100mA、I_7=1000mA，求各分流电阻R_1、R_2、R_3、R_4、R_5、R_6、R_7的值。

解：根据电阻并联的分流公式，当表头与分流电阻并联时，流过表头的电流I_g为

$$I_g = \frac{R_S}{R_g + R_S} I$$

可得到

$$R_S = \frac{I_g}{I - I_g} R_g = \frac{1}{\frac{I}{I_g} - 1} R_g$$

式中，I_g为表头的满刻度偏转电流，I为电流量程。

当$I=I_1$=10μA时

$$R_1 = R_S = \frac{1}{\frac{10}{9.3} - 1} \times 3.76 = 49.95\text{k}\Omega \approx 50\text{k}\Omega$$

当$I=I_2$=50μA时

$$R_2 = R_S = \frac{1}{\frac{50}{9.3} - 1} \times 3760 = 859.2\Omega$$

当$I=I_3$=100μA时

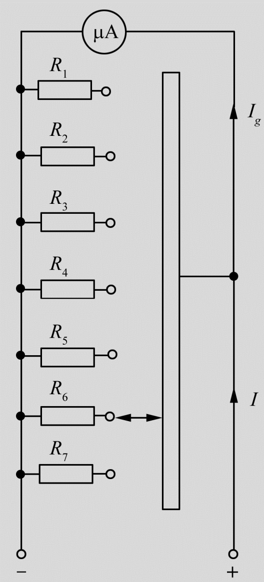


图 2.21　万用表分流电路

$$R_3 = R_S = \frac{1}{\frac{100}{9.3} - 1} \times 3760 = 385.5\Omega$$

当$I=I_4$=1mA 时

$$R_4 = R_S = \frac{1}{\frac{1000}{9.3} - 1} \times 3760 = 35.3\Omega$$

当$I=I_5$=10mA 时

$$R_5 = R_S = \frac{1}{\frac{10000}{9.3} - 1} \times 3760 = 3.5\Omega$$

当$I=I_6$=100 mA 时

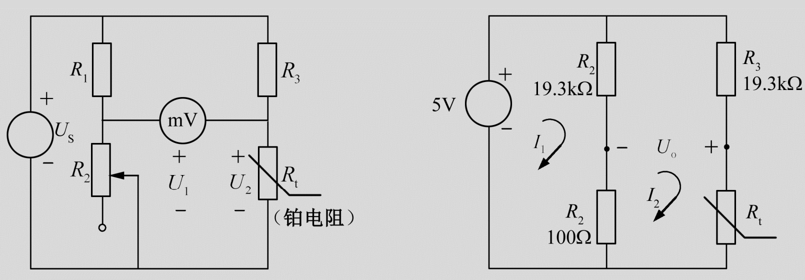
$$R_6 = R_S = \frac{1}{\frac{100000}{9.3} - 1} \times 3760 = 0.3497\Omega$$

当$I=I_7$=1000mA 时

$$R_7 = R_S = \frac{1}{\frac{1000000}{9.3} - 1} \times 3760 = 0.03497\Omega$$

例 2.14　铂电阻温度传感器测量电路分析：铂电阻温度传感器利用铂电阻的电阻值随温度变化而变化的物理特性制作而成。应用铂电阻温度传感器的温度测量电路如图 2.22（a）所示。这是一个惠斯通电桥，图中 R_t 为铂电阻，假设在某个基准温度（如 0℃）下，调节电桥桥臂平衡，此时电压表读数为零。如果温度改变，铂电阻的阻值随温度相应变化，电桥平衡被打破，电压表测得的电压值也随温度相应变化。如果合理设计电阻 R_1、R_2、R_3 的阻值就可以使电压表的读书和温度 T 之间满足线性关系，这样就可以根据电压表电压对应出温度数据。

铂电阻测温电路可画成图 2.22（b）所示电路，设铂电阻 R_t 在 0℃时的阻值为 100Ω、电阻变化率约为 0.3851Ω/℃，试分析当电压表测得 U_o=5mV 时，温度计显示温度应为多少？



（a）惠斯通电桥　　（b）铂电阻测温电路

图 2.22　铂电阻温度传感器测量电路

解：本题实质是求铂电阻 R_t 的问题，一旦求出 R_t，便可以计算出对应的温度值。应用电阻分压公式求解，即

$$U_o = 5 \times \frac{R_t}{R_t + R_3} - 5 \times \frac{R_2}{R_2 + R_1}$$

解得

$$R_t \approx 120\Omega$$

故温度为

$$T = \frac{120 - 100}{0.3851} \approx 52℃$$

本 章 小 结

本章主要对支路电流法、叠加原理和戴维南定理三种基本电路分析方法及其应用进行了介绍。

支路电流法以支路电流为未知量，通过对 $n-1$ 个独立节点列 KCL 方程，对 $l-(n-1)$个网孔列 KVL 方程，然后求解联立方程获得支路电流。

叠加原理对于求解多电源电路具有明显优势。注意只有线性电路才可使用叠加原理。叠加时要注意分量与总量的参考方向。叠加原理只能适用于线性电路。

任何一个有源二端网络都可通过戴维南定理进行等效简化。戴维南定理通过求解有源二端网络的开路电压和入端电阻，将有源二端网络简化成一条含源支路，进而简化电路计算。求入端电阻时要注意将二端网络内部电压源短路、电流源开路；求开路电压时，要注意开路电压的方向。

习　题　2

2.1　填空题

（1）对 n 个节点、l 条支路的电路，可列写________个独立的 KCL 方程，__________个独立的 KVL 方程。独立的 KVL 方程数目一般与________个数相同。

（2）叠加原理只适用于________电路。

（3）应用叠加原理时，不作用的电压源视为______，不作用的电流源视为______。

（4）求一个二端网络的戴维南等效电阻时，该网络中所有的独立电源应作________处理；其中________应开路，________应短路。

（5）利用戴维南定理可以把任何一个_______二端网络等效成一个实际电压源模型。

（6）任何一个线性有源二端网络，总可以用一个等效含源支路来有效替代，含源支路的电压等于该有源二端网络的________，含源支路的电阻等于该有源二端网络的_________。

（7）有源二端网络的戴维南等效电路实际是一条由一个_________和一个_________组成的串联支路。

2.2　求图 2.23 中各支路的电流 I_1、I_2、I_3。

2.3　求图 2.24 中通过电压源的电流 I_1、I_2 及电源功率，并说明它们各自起电源作用还是负载作用。

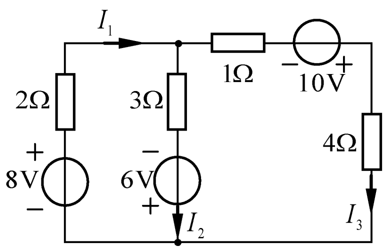


图 2.23　习题 2.2 图

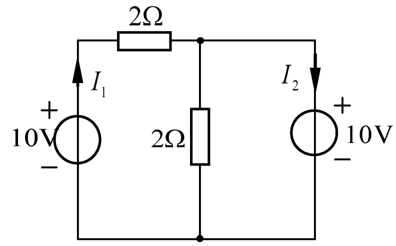


图 2.24　习题 2.3 图

2.4　用支路电流法求图 2.25 所示电路的各支路电流。

2.5　用支路电流法求图 2.26 所示电路中各支路电流。

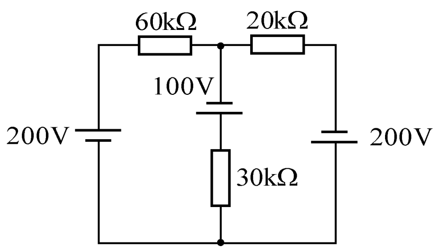


图 2.25　习题 2.4 图

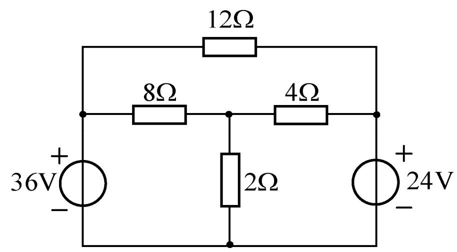


图 2.26　习题 2.5 图

2.6　用支路电流法求图2.27所示电路中各支路电流。

2.7　用叠加原理求图2.28所示电路中的电流I_1和I_2。

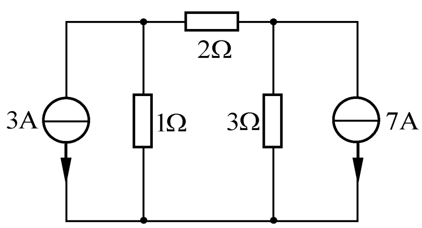


图 2.27　习题 2.6 图

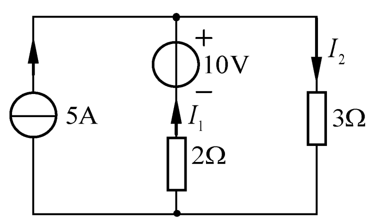


图 2.28　习题 2.7 图

2.8　求图2.29所示电路中的电流I_1和I_2。

2.9　用叠加原理计算图2.30所示电路中的电流I。

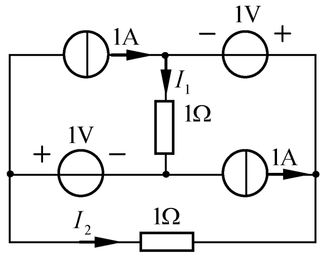


图2.29　习题2.8图

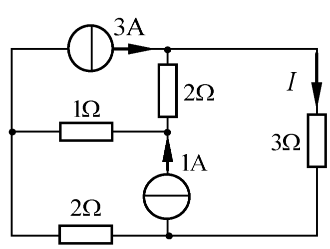


图2.30　习题2.9图

2.10　用叠加原理求图 2.31 所示电路中的电压 U。

2.11　用戴维南定理求图 2.32 所示电路中的电流 I。

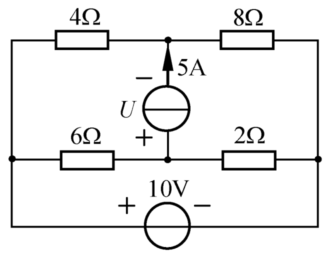


图 2.31　习题 2.10 图

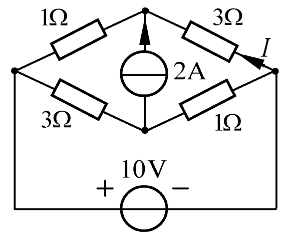


图 2.32　习题 2.11 图

2.12　求图2.33所示有源二端网络的戴维南等效电路。

2.13　图 2.34 所示电路，电流 I 的最大值为多少？负载电阻 R 为何值时可获得最大功率？

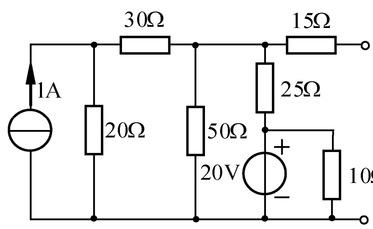


图 2.33　习题 2.12 图

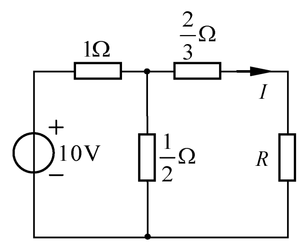


图 2.34　习题 2.13 图

2.14　用戴维南定理求图 2.35 所示电路中电阻 R_L 上的电流。

2.15　求图 2.36 所示电路中的负载电流 I。

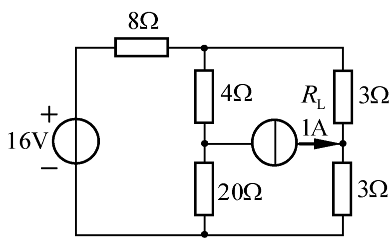


图 2.35　习题 2.14 图

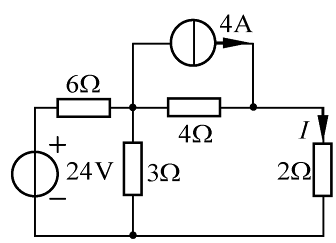


图 2.36　习题 2.15 图

2.16　如图 2.37 所示电路，已知 $I_S = 2\text{mA}$，$U = 15\text{V}$，$R = 5\text{k}\Omega$。N 是一个含源网络。开关闭合前，电压表的读数为 12V，方向为从上向下。开关闭合时，电流表的读数为 0.5mA，方向为从左向右。求 N 的戴维南等效电路。

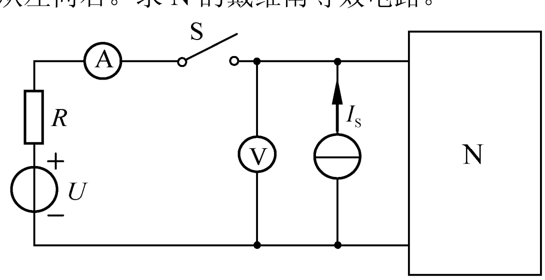


图 2.37　习题 2.15 图

第 3 章　单相正弦交流电路

交流电是目前供电和用电的主要形式。本章着重介绍正弦交流电路的基本概念、基本理论和基本分析方法。正弦交流电路存在一些直流电路中没有的物理现象，在学习本章内容时，必须建立正弦交流电路的概念。

3.1　正弦交流电基本概念

3.1.1　正弦量

前面两章我们分析的是直流电路，其中的电压和电流的大小与极性（或电流的方向）是不随时间而变化的，如图 3.1 所示。但在实际应用中，常见的是随时间变化的电压和电流，其中最常用的是电压和电流按照正弦规律周期性变化，其波形如图 3.2 所示。由于正弦电压和电流的方向是周期性变化的，在电路图上所标的方向是指它们的参考方向，即代表正半周时的方向。在负半周时，由于所标的参考方向与实际方向相反，其值为负。

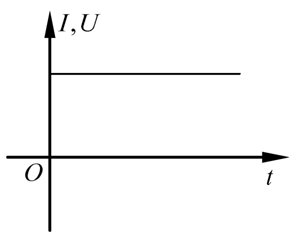


图 3.1　直流电

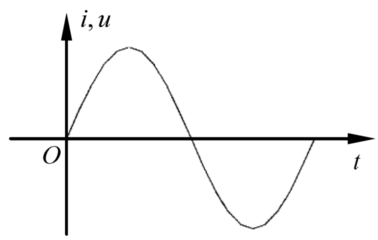


图 3.2　正弦交流电

随时间按正弦规律变化的电压和电流，称为正弦交流电或正弦量。正弦量的特征表现在大小、变化快慢和初始值三个方面，它们分别由幅值、频率和初相位来确定，称为正弦量的三要素。

3.1.2　正弦量的三要素

以正弦电流为例介绍正弦量的三要素。某一正弦电流的波形如图 3.3 所示，其三角函数数学表达式（瞬时表达式）为

$$i = I_{\mathrm{m}} \sin(\omega t + \varphi_i)\ \mathrm{A} \qquad (3\text{-}1)$$

式中，I_{m} 为幅值；ω 为角频率；φ_i 为初相位。正弦量在任一瞬时的值称为瞬时值，用小写字母 i 和 u 表示电流和电压。已知正弦量的三要素，即可确定正弦量的瞬时表达式和波形。

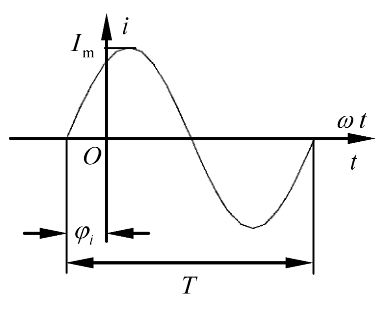


图 3.3　正弦电流的波形

1．幅值（最大值）和有效值

正弦量的最大瞬时值称为幅值，也称最大值，表示交流电的强度，用带下标 m 的大写字母表示，如式（3-1）中的 I_m。

工程实际应用和分析计算时，往往不是用它们的幅值，而是采用有效值来计量正弦量的大小，用相应的大写字母来表示。有效值是根据电流热效应来规定的。在阻值相同的两个电阻 R 中，分别通入直流电流 I 和交流电流 i。如果在一个周期内，它们各自在电阻上产生的热量相等，则这个直流电流 I 就称为交流电流 i 的有效值。

电阻 R 在 T 时间内通过直流电流 I 所产生的热量为

$$Q_I = 0.24 I^2 RT \tag{3-2}$$

而正弦交流电流在一个周期时间 T 内是不停地变化着的，所以它产生的总热量应当用积分求得

$$Q_i = \int_0^T 0.24 i^2 R \mathrm{d}t \tag{3-3}$$

按照定义，有

$$\int_0^T 0.24 i^2 R \mathrm{d}t = 0.24 I^2 RT \tag{3-4}$$

由上式可得交流电流的有效值

$$I = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T i^2 \mathrm{d}t} \tag{3-5}$$

由式（3-5）可知，交流电的有效值等于它的瞬时值的平方在一个周期内积分的平均值再取平方根，因此，有效值又称方均根值。

将式（3-1）代入式（3-5）可得正弦电流有效值为

$$I = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T I_m^2 \sin^2(\omega t + \phi_i)\mathrm{d}t} = \sqrt{\frac{1}{T} I_m^2 \frac{T}{2}} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 0.707 I_m \tag{3-6}$$

同理，正弦交流电压的有效值与幅值之间的关系为

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = 0.707 U_m \tag{3-7}$$

由此可见，正弦量的幅值（最大值）是其有效值的 $\sqrt{2}$ 倍。有效值可以代替幅值作为正弦量的一个要素。通常所讲的正弦电压和电流的大小，都是指其有效值。

2．周期、频率和角频率

正弦量变化的快慢可以用周期和频率表示。正弦量变化一次所需要的时间称为周期，用 T 表示，单位为秒（s）。每秒内正弦量变化的次数称为频率，用 f 表示，单位为赫兹（Hz）。频率是周期的倒数。

我国和大多数国家采用 50 Hz 作为电力标准频率，称为工频。但有些国家（如美国、日本等）采用 60Hz。除工频外，某些领域也需要采用其他频率，如高速电机的频率是 150～2000Hz；收音机中波的频率为 530～1600Hz，短波是 2.3～23MHz；移动通信信号的频率则

高达 150MHz～1.8GHz；高频加热炉的频率一般为 200～300kHz 等。

正弦量在单位时间内变化的角度称为角频率，用 ω 表示，单位为弧度每秒（rad/s）。周期 T、频率 f 和角频率 ω 三者之间的关系为

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \tag{3-8}$$

3．初相位

正弦量随时间变化的角度称为相位角，简称相位。例如，式（3-1）表示的正弦量的相位为 $\omega t+\varphi_i$。相位可以表示正弦量在某时刻的状态，也反映出正弦量变化的进程。

开始计时（$t=0$）时的相位角称为初相位，简称初相，单位是弧度（rad），也可用度（°）。初相位的正负和大小与计时起点的选择有关，如果在 $t=0$ 时刻正弦量的瞬时值大于零，则初相为正；如果在 $t=0$ 时刻正弦量的瞬时值小于零，则初相为负。图 3.4 给出了几种具有不同初相的正弦电流的波形。

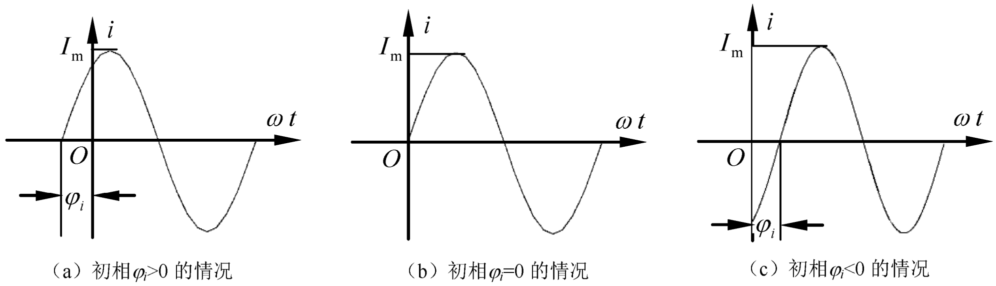


图 3.4　不同初相位的正弦电流波形

对于某一正弦交流电，只要它的“三要素”被确定下来，它在任意时刻的状态就被确定了。实际上，在常见的交流电路中，角频率是已知的常数，因此只要计算出幅值（或有效值）和初相就可以了。

例 3.1　已知 $u=U_m\sin(\omega t+30^\circ)$V、$U_m$=311V、$f$=50Hz，试求有效值 U、周期 T、角频率 ω 及 $t=0.1$ s 时的瞬时值 $u(0.1)$。

解：$U=\dfrac{U_m}{\sqrt{2}}=\dfrac{1}{\sqrt{2}}\times 311=220\text{V}$

$$T=\frac{1}{f}=\frac{1}{50}=0.02\text{s}$$

$$\omega=2\pi f=2\times 3.14\times 50=100\pi=314\,\text{rad/s}$$

$$u=U_m\sin(\omega t+30^\circ)=314\sin(2\pi ft+30^\circ)=311\sin(314t+30^\circ)\text{V}$$

$$u(0.1)=311\sin(100\pi\times 0.1+\frac{\pi}{6})=155.5\text{V}$$

3.1.3　同频率正弦量的比较

在同一正弦交流电路中，电压和电流的频率是相同的，但初相位不一定相同。常引用“相位差”的概念描述两个同频率正弦量之间的相位关系。例如，设两个同频率正弦电压 u

和电流 i 分别为

$$u=\sqrt{2}U\sin(\omega t+\varphi_u)\text{V} \tag{3-9}$$

$$i=\sqrt{2}I\sin(\omega t+\varphi_i)\text{A} \tag{3-10}$$

它们的波形如图 3.5 所示。

两个同频率正弦量的相位角之差，称为相位差，用 φ 表示。在式（3-9）和式（3-10）中，u 和 i 的相位差为

$$\varphi=(\omega t+\varphi_u)-(\omega t+\varphi_i)=\varphi_u-\varphi_i \tag{3-11}$$

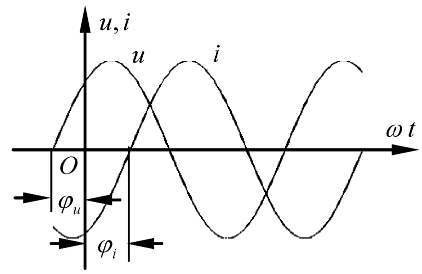


图 3.5　同频率正弦量的波形

同频率两正弦量的相位差等于它们的初相之差，是一个与时间无关的常数。

如果相位差 $\varphi>0$，则 u 比 i 先到达正最大值，这时我们说，在相位上 u 比 i 超前 φ 角，或者说 i 比 u 滞后 φ 角，如图 3.5 所示的波形；如果 $\varphi<0$，则 u 比 i 后到达正最大值，在相位上 u 比 i 滞后 φ 角，或者说 i 比 u 超前 φ 角。特别地，如果相位差 $\varphi=0$，则称两者同相；如果相位差 $\varphi=\pm180°$，则称两者反相；如果 $\varphi=\pm90°$，则称为两者正交。

在交流电路中，经常需要研究多个同频率正弦量之间的相位关系，为方便起见，可以选择其中某一个正弦量作为参考，取其初相角为 0°，称为参考正弦量。

例 3.2　已知正弦电压和电流，$u=310\sin(100\pi t+40^\circ)\text{V}$，$i=10\sin(100\pi t-20^\circ)\text{A}$，试判断两个正弦量之间的相位关系。

解：相位差为

$$\varphi=\varphi_u-\varphi_i=40^\circ-(-20^\circ)=60^\circ>0$$

说明电压 u 超前电流 i 60°或电流 i 滞后电压 u 60°。

3.2　正弦量的相量表示

在分析正弦交流电路时，经常遇到正弦量的运算。直接利用三角函数或波形图进行正弦交流电路的分析与计算将十分繁琐。因此，常用相量表示正弦量，这样就把三角运算简化成复数形式的代数运算，从而使计算得到大大简化。

3.2.1　向量与复数

如图 3.6（a）所示，复平面内有一点 A。表示成代数形式为

$$A=a+\text{j}b \tag{3-12}$$

其中，a 为实部，b 为虚部；j 为虚数单位，即 $\text{j}=\sqrt{-1}$。

复数 $A=a+\text{j}b$ 也可以用一个从原点 O 到 A 点的向量 OA 来表示，如图 3.6（b）所示。向量的长度 r 称为复数的模，向量与实轴正方向的夹角 θ 称为复数的辐角，且有

$$r=\sqrt{a^2+b^2} \tag{3-13}$$

$$\theta = \arctan\frac{b}{a} \tag{3-14}$$

向量 OA 在实轴和虚轴上的投影分别为复数 A 的实部 a 和虚部 b。

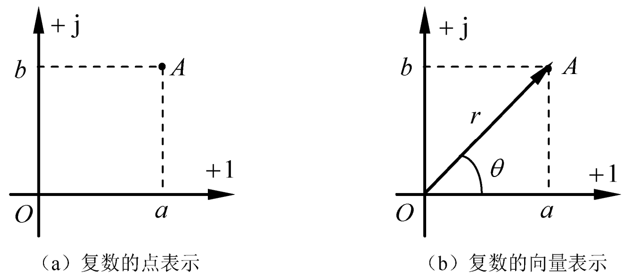


图 3.6　复数在复平面上表示

由于

$$\begin{cases} a = r\cos\theta \\ b = r\sin\theta \end{cases} \tag{3-15}$$

所以

$$A = a + \mathrm{j}b = r\cos\theta + \mathrm{j}r\sin\theta = r(\cos\theta + \mathrm{j}\sin\theta) \tag{3-16}$$

根据欧拉公式

$$\mathrm{e}^{\mathrm{j}\theta} = \cos\theta + \mathrm{j}\sin\theta \tag{3-17}$$

所以式（3-16）可写为

$$A = r\mathrm{e}^{\mathrm{j}\theta} \tag{3-18}$$

或简写为

$$A = r\angle\theta \tag{3-19}$$

所以复平面内的向量 OA 表示成复数形式有以下 4 种：

$$OA = a + \mathrm{j}b = r(\cos\theta + \mathrm{j}\sin\theta) = r\mathrm{e}^{\mathrm{j}\theta} = r\angle\theta \tag{3-20}$$

4 种表示方法依次分别称为复数的代数式、三角式、指数式和极坐标式。复数在加减运算时，采用代数式，只需实部与实部相加减，虚部与虚部相加减。复数的加减也可以按平行四边形法则在复平面上用向量的相加和相减求得。复数的乘、除运算采用极坐标式或指数式比较方便，只需模相乘（除），辐角相加（减）。

例 3.3　已知 $A_1 = 6 + \mathrm{j}8$，$A_2 = 4 - \mathrm{j}3$，试计算 $A_1 + A_2$、$A_1 - A_2$、$A_1 \times A_2$ 和 $\dfrac{A_1}{A_2}$。

解：$A_1 + A_2 = 6 + \mathrm{j}8 + 4 - \mathrm{j}3 = 10 + \mathrm{j}5$

$A_1 - A_2 = 6 + \mathrm{j}8 - (4 - \mathrm{j}3) = 2 + \mathrm{j}11$

$A_1 = 6 + \mathrm{j}8 = 10\angle 53.1^\circ$

$A_2 = 4 - \mathrm{j}3 = 5\angle -36.9^\circ$

$A_1 \times A_2 = 10\angle 53.1^\circ \times 5\angle -36.9^\circ = 50\angle 16.2^\circ$

$$\frac{A_1}{A_2}=\frac{10\angle 53.1^\circ}{5\angle -36.9^\circ}=2\angle 90^\circ$$

3.2.2　正弦量的相量表示

相量是用来表示正弦量的复数。设有一正弦电压 u，函数表达式如下：

$$u=U_\text{m}\sin(\omega t+\varphi_u)\text{V} \qquad (3\text{-}21)$$

又有一复数 $U_\text{m}\text{e}^{\text{j}(\omega t+\varphi_u)}$，将其转化为三角形式为

$$U_\text{m}\text{e}^{\text{j}(\omega t+\varphi_u)}=U_\text{m}\cos(\omega t+\varphi_u)+\text{j}U_\text{m}\sin(\omega t+\varphi_u) \qquad (3\text{-}22)$$

比较式（3-21）和式（3-22）可以看出，正弦电压 u 恰好是复数 $U_\text{m}\text{e}^{\text{j}(\omega t+\varphi_u)}$ 的虚部，即

$$u=U_\text{m}\sin(\omega t+\varphi_u)=\text{Im}[U_\text{m}\text{e}^{\text{j}(\omega t+\varphi_u)}] \qquad (3\text{-}23)$$

式（3-23）表明，通过数学方法，可以把一个实数范围的正弦量与一个复数一一对应起来，即

$$u=\text{Im}[U_\text{m}\text{e}^{\text{j}(\omega t+\varphi_u)}]=\text{Im}[\sqrt{2}U\text{e}^{\text{j}\varphi_u}\text{e}^{\text{j}\omega t}]=\text{Im}[\sqrt{2}\dot{U}\text{e}^{\text{j}\omega t}] \qquad (3\text{-}24)$$

其中 $\dot{U}=U\text{e}^{\text{j}\varphi_u}=U\angle\varphi_u$ 是一个复数，它包含了正弦电压的有效值和初相两个要素。这样，在角频率 ω 已知时，正弦电压 u 就可以完全确定了。

表征正弦电压 u 的复数 $\dot{U}$，称为正弦电压 u 的有效值相量，记作

$$\dot{U}=U\text{e}^{\text{j}\varphi_u}=U\angle\varphi_u \qquad (3\text{-}25)$$

由正弦量的幅值与有效值之间的关系可得幅值相量和有效值相量之间的关系为

$$\dot{U}_\text{m}=\sqrt{2}\dot{U} \qquad (3\text{-}26)$$

实际应用中所涉及的大多数是正弦量的有效值，因此一般所说的相量都是指有效值相量，并简称相量。相量 $\dot{U}$ 上的小黑点表示此复数代表正弦量。需要注意的是，相量只是用来表征或代表特定频率的正弦量，而不等于正弦量。正弦量用相量表示后，正弦量的运算转化为复数运算。

例 3.4　已知 $i_1=6\sqrt{2}\sin\omega t\text{A}$，$i_2=5\sqrt{2}\sin(\omega t-130^\circ)\text{A}$，$i_3=10\sqrt{2}\sin(\omega t+40^\circ)\text{A}$，$u=220\sqrt{2}\sin(314t+30^\circ)\text{V}$，试写出它们的相量。

解：　$\dot{I}_1=6\angle 0^\circ\text{A}$

$\dot{I}_2=5\angle -130^\circ\text{A}$

$\dot{I}_3=10\angle 40^\circ\text{A}$

$\dot{U}=220\angle 30^\circ\text{V}$

例 3.5 已知 $i_1 = 100\sin(\omega t + 45^\circ)\text{A}$ 、 $i_2 = 60\sin(\omega t - 30^\circ)\text{A}$ ，求 $i = i_1 + i_2$ 。

解： $\dot{I}_1 = \dfrac{100}{\sqrt{2}}\angle 45^\circ\ \text{A} = 50 + \text{j}50$

$$\dot{I}_2 = \frac{60}{\sqrt{2}}\angle -30^\circ\ \text{A} = 15\sqrt{6} - \text{j}15\sqrt{2}$$

$$\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 = 50 + \text{j}50 + 15\sqrt{6} - \text{j}15\sqrt{2} = 91.4\angle 18.4^\circ\ \text{A}$$

所以

$$i = i_1 + i_2 = 129\sin(\omega t + 18.4^\circ)\text{A}$$

相量也可以用复平面上的有向线段表示，这种用来表示相量的图形称为相量图。相量的模即正弦量的有效值，相量与正实轴的夹角即正弦量的初相角。在相量图上能形象地表示各个正弦量的大小和相位关系，相量的运算符合平行四边形法则，可在相量图上进行相量的加减运算。注意，只有同频率的正弦量才能画在同一个相量图上。

例 3.6 已知 $i_1 = 3\sqrt{2}\sin(\omega t + 90^\circ)\text{A}$ 、 $i_2 = 4\sqrt{2}\sin\omega t\text{A}$ ，求 $i = i_1 + i_2$ 。

解： $\dot{I}_1 = 3\angle 90^\circ\ \text{A}$

$$\dot{I}_2 = 4\angle 0^\circ\ \text{A}$$

所以

$$\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 = 5\angle 36.9^\circ\ \text{A}$$

即 $i = i_1 + i_2 = 5\sqrt{2}\sin(\omega t + 36.9^\circ)\text{A}$

相量图如图 3.7 所示。

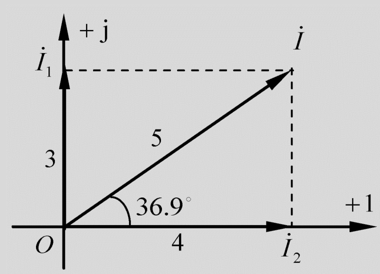


图 3.7　例 3.6 相量图

3.3　单一参数交流电路

3.3.1　电阻元件的交流电路

图 3.8（a）是一个线性电阻元件的交流电路，电压和电流为关联参考方向。由欧姆定律可知

$$u = Ri \tag{3-27}$$

以电流 i 为参考正弦量，即

$$i = I_{\mathrm{m}} \sin \omega t = \sqrt{2} I \sin \omega t \tag{3-28}$$

电阻元件两端电压为

$$u = Ri = R\sqrt{2} I \sin \omega t = \sqrt{2} U \sin \omega t \tag{3-29}$$

电压和电流波形如图 3.8（b）所示。

可以看出，电阻元件的交流电路中，电压和电流频率相同，相位相同（相位差φ=0°）。电压和电流的有效值关系为

$$U = RI \tag{3-30}$$

或

$$R = \frac{U}{I} \tag{3-31}$$

由此可知，在电阻元件的交流电路中，电压的有效值与电流有效值之比就是电阻 R。

电压和电流用相量表示，则为

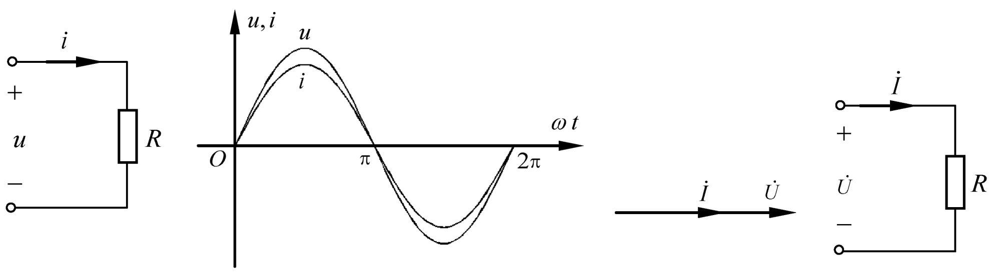
$$\dot{U} = U\angle 0^{\circ}$$

$$\dot{I} = I\angle 0^{\circ}$$

所以电压、电流关系的相量形式为

$$\dot{U} = R\dot{I} \tag{3-32}$$

由此可知，在交流电路中，线性电阻元件的电压和电流相量之间以及有效值之间的伏安关系均遵循欧姆定律。$\dot{U} = R\dot{I}$ 称为相量形式的欧姆定律。电压和电流的相量图如图 3.8（c）所示，电阻元件的相量模型如图 3.8（d）所示。



（a）电阻元件　（b）电压和电流波形　（c）相量图　（d）相量模型

图 3.8　电阻元件的交流电路

例 3.7 把一个 100Ω 的电阻元件接到频率为 50Hz、电压有效值为 10V 的正弦交流电源上，问电流是多少？如保持电压值不变，而电源频率改变为 5000Hz，这时电流将为多少？

解：接到 50Hz 电源上时，通过电阻的电流有效值为

$$I = \frac{U}{R} = \frac{10}{100} = 0.1\mathrm{A}$$

因电阻元件的阻值与频率无关，所以电源频率改变为 5000Hz 时，如保持电压值不变，仍有 $I = 0.1\mathrm{A}$ 。

3.3.2　电感元件的交流电路

图 3.9（a）是一个线性电感元件的交流电路，电压和电流为关联参考方向。由电感元件电压与电流的关系可知

$$u = L\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} \tag{3-33}$$

以电流 i 为参考正弦量，即设

$$i = I_\mathrm{m}\sin\omega t = \sqrt{2}I\sin\omega t \tag{3-34}$$

电感元件两端电压为

$$\begin{aligned} u &= L\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} = \omega L I_\mathrm{m}\cos\omega t = \omega L I_\mathrm{m}\sin(\omega t + 90^\circ) \\ &= U_\mathrm{m}\sin(\omega t + 90^\circ)t = \sqrt{2}U\sin(\omega t + 90^\circ) \end{aligned} \tag{3-35}$$

可以看出，在交流电路中，电感元件的电压和电流是同频率的正弦量，但电感电压相位超前电流 90°。电压和电流波形如图 3.9（b）所示。

电压和电流的幅值和有效值关系分别为

$$\begin{aligned} U_\mathrm{m} &= \omega L I_\mathrm{m} \\ U &= \omega L I \end{aligned} \tag{3-36}$$

或

$$\omega L = \frac{U_\mathrm{m}}{I_\mathrm{m}} = \frac{U}{I} \tag{3-37}$$

由此可知，在电感元件的交流电路中，电压和电流的幅值或有效值之比为ωL。ωL 对交流电起阻碍作用，称为感抗，用 X_L 表示，即

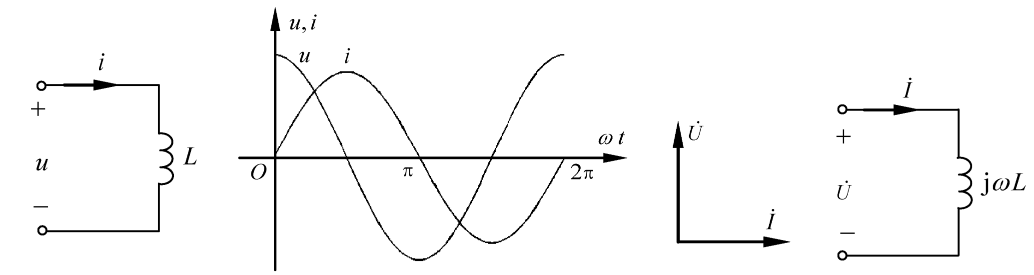
$$X_\mathrm{L} = \omega L = 2\pi f L \tag{3-38}$$

感抗的单位为欧姆。感抗 X_L 与电感 L 和频率 f 成正比，频率越高，感抗越大；频率越低，感抗越小；频率为零，感抗为零。所以，在直流电路中，电感元件相当于短路。

用相量表示电感的电压和电流，则有

$$\begin{aligned} \dot{U} &= U\angle 90^\circ \\ \dot{I} &= I\angle 0^\circ \\ \dot{U} &= \mathrm{j}X_\mathrm{L}\dot{I} = \mathrm{j}\omega L\dot{I} \end{aligned} \tag{3-39}$$

图 3.9（c）是电感电路电压和电流的相量图。电感元件的相量模型如图 3.9（d）所示。



（a）电感元件　　（b）电压和电流波形　　（c）相量图　　（d）相量模型

图 3.9　电感元件的交流电路

例 3.8 有一电感线圈，可看成是 0.1H 的纯电感。将其接到 50Hz、10V 的正弦交流电源上，问其电流是多少？如保持电压值不变，而电源频率改变为 5000Hz，电流将为多少？

解：当 f=50Hz 时

$$X_L = 2\pi fL = 2\times 3.14\times 50\times 0.1 = 31.4\Omega$$

$$I = \frac{U}{X_L} = \frac{10}{3.14} = 0.318\text{A}$$

当 f=5000Hz 时

$$X_L = 2\pi fL = 2\times 3.14\times 5000\times 0.1 = 3140\Omega$$

$$I = \frac{U}{X_L} = \frac{10}{3140} = 3.18\text{mA}$$

可见，在电压值不变时，频率越高，通过电感电流的有效值越小。

3.3.3　电容元件的交流电路

图 3.10（a）是一个线性电容元件的交流电路，电压和电流为关联参考方向。设电容两端电压为

$$u = U_m \sin\omega t = \sqrt{2}U\sin\omega t \tag{3-40}$$

则流过电容元件的电流为

$$\begin{aligned} i &= C\frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}t} = \omega CU_m \cos\omega t = \omega CU_m \sin(\omega t + 90^\circ) \\ &= I_m \sin(\omega t + 90^\circ)t = \sqrt{2}I\sin(\omega t + 90^\circ) \end{aligned} \tag{3-41}$$

可以看出，在交流电路中，电容元件电压和电流是频率相同的正弦量，但在相位上电容电压滞后电流 90°。电压和电流波形如图 3.10（b）所示。

电压和电流的幅值（或有效值）的关系为

$$I_m = \omega CU_m \tag{3-42}$$

或

$$I = \omega CU$$

或

$$\frac{1}{\omega C}=\frac{U_{\mathrm{m}}}{I_{\mathrm{m}}}=\frac{U}{I} \tag{3-43}$$

由此可知，在电容元件的交流电路中，电压和电流的幅值或有效值之比为 $1/\omega C$。它对交流电起阻碍作用，称之为容抗，用 X_{C} 表示，即

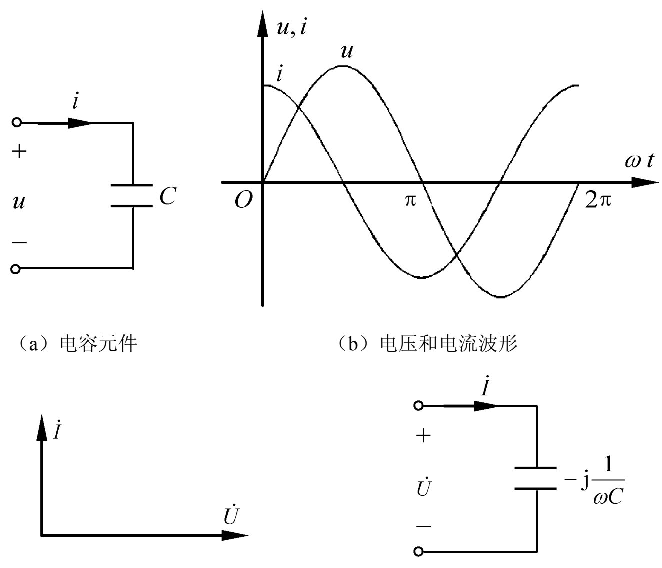
$$X_{\mathrm{C}}=\frac{1}{\omega C}=\frac{1}{2\pi fC} \tag{3-44}$$

容抗 X_{C} 与电容 C 和频率 f 成反比。频率越高，容抗越小；频率越低，容抗越大；频率为零，容抗无穷大。所以，在直流电路中，电容元件相当于开路。

电压和电流用相量表示，则

$$\begin{aligned}\dot{U}&=U\angle 0^{\circ}\\ \dot{I}&=I\angle 90^{\circ}\\ \dot{U}&=-\mathrm{j}X_{\mathrm{C}}\dot{I}=-\mathrm{j}\frac{1}{\omega C}\dot{I}\end{aligned} \tag{3-45}$$

图 3.10（c）是电容电压和电流的相量图。电容元件的相量模型如图 3.10（d）所示。



（a）电容元件　（b）电压和电流波形

（c）相量图　（d）相量模型

图 3.10　电容元件的交流电路

例 3.9 把一个 25μF 的电容元件接到 50Hz、10V 的正弦交流电源上，电流是多少？如保持电压值不变，而电源频率改变为 5000Hz，电流将为多少？

解：当 f=50Hz 时

$$X_{\mathrm{C}}=\frac{1}{\omega C}=\frac{1}{2\pi fC}=\frac{1}{2\times 3.14\times 50\times 25\times 10^{-6}}=127.4\Omega$$

则

$$I=\frac{U_{\mathrm{C}}}{X_{\mathrm{C}}}=\frac{10}{127.4}=0.078\mathrm{A}=78\mathrm{mA}$$

当 f=5000Hz 时，

$$X_C = \frac{1}{2 \times 3.14 \times 5000 \times 25 \times 10^{-6}} = 1.274\Omega$$

则

$$I = \frac{10}{1.274} = 7.8\text{A}$$

可见，在电压值不变时，频率越高，通过电容元件的电流的有效值越大。

3.4　一般单相交流电路

3.4.1　基尔霍夫定律的相量形式

分析交流电路的依据仍然是基尔霍夫定律，因为在任何瞬间，电压和电流值总服从基尔霍夫定律，即对于任一节点，$\sum i$=0；对任一回路，$\sum u = 0$。表述成相量形式，分别为

$$\sum \dot{I} = 0 \text{（KCL）} \tag{3-46}$$

即对于交流电路的任一节点，电流相量的代数和为零。

$$\sum \dot{U} = 0 \text{（KVL）} \tag{3-47}$$

即对于交流电路的任一回路，电压相量的代数和为零。

例 3.10　如图 3.11（a）所示电路，已知 $i_1(t) = 10\sqrt{2}\sin(\omega t + 30^\circ)\text{A}$，$i_2(t) = 5\sqrt{2}\sin(\omega t - 90^\circ)\text{A}$，$u_1(t) = -10\sqrt{2}\sin(\omega t + 30^\circ)\text{V}$，$u_2(t) = 8\sqrt{2}\sin(\omega t + 90^\circ)\text{V}$，求电流源电流 $i_S(t)$ 及其两端电压 $u(t)$。

解：$\dot{I}_1 = 10\angle 30^\circ \text{A}$

$\dot{I}_2 = 5\angle -90^\circ \text{A}$

根据 KCL，有

$$\dot{I}_S = \dot{I}_1 - \dot{I}_2 = 10\angle 30^\circ - 5\angle -90^\circ = 13.23\angle 49.1^\circ \text{A}$$

即

$$i_S(t) = 13.23\sqrt{2}\sin(\omega t + 49.1^\circ)\text{A}$$

电流相量图如图 3.11（b）所示。

$\dot{U}_1 = 10\angle -150^\circ \text{V}$

$\dot{U}_2 = 8\angle 90^\circ \text{V}$

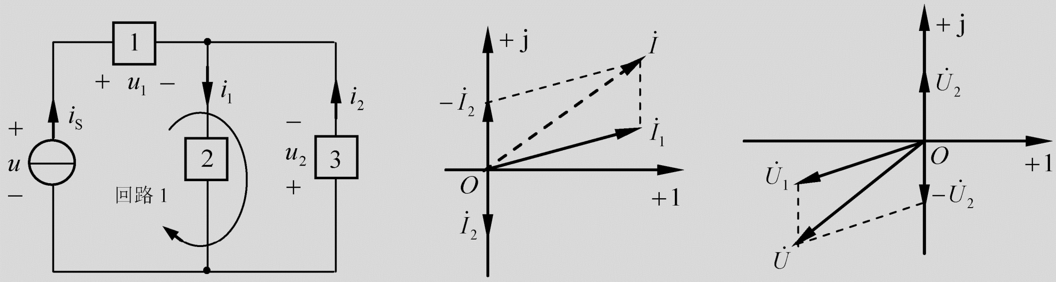
根据 KVL，有

$$\dot{U} = \dot{U}_1 - \dot{U}_2 = 10\angle -150^\circ - 8\angle 90^\circ = 15.62\angle -123.7^\circ \text{V}$$

即

$u(t)=15.62\sqrt{2}\sin(\omega t-123.7^\circ)\text{V}$

电压相量图如图 3.11（c）所示。



（a）例 3.10 电路图　（b）电流相量图　（c）电压相量图

图 3.11　例 3.10 图

3.4.2　阻抗及其串、并联

1．阻抗

图 3.12（a）所示是一个含有线性电阻、电容或电感等元件、但不含有电源的二端网络，当在其端口施加正弦电压时，端口电流将是同频率的正弦量。端口电压相量和电流相量之比称为复阻抗，简称阻抗，用大写字母 Z 表示，即

$$Z=\frac{\dot{U}}{\dot{I}}=\frac{U}{I}\angle\varphi_u-\varphi_i=|Z|\angle\varphi \tag{3-48}$$

其中，$|Z|=\dfrac{U}{I}$ 称为阻抗模，$\varphi=\varphi_u-\varphi_i$ 称为阻抗角。阻抗的单位为欧姆（Ω）。阻抗在电路中用图 3.12（b）所示符号表示。

阻抗也可以用代数形式表示，即

$$Z=R+\text{j}X \tag{3-49}$$

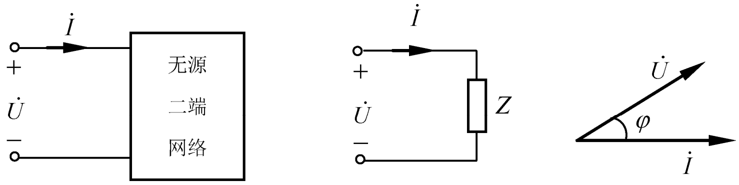
其中实部 R 称为等效电阻，虚部 X 称为电抗。$|Z|$、φ、R 和 X 之间的转换关系为

$$\begin{cases}|Z|=\sqrt{R^2+X^2}\\ \varphi=\arctan\dfrac{X}{R}\end{cases} \tag{3-50}$$

或

$$\begin{cases}R=|Z|\cos\varphi\\ X=|Z|\sin\varphi\end{cases} \tag{3-51}$$

图 3.12（c）画出了该无源二端网络的电压、电流相量图。阻抗角 φ 同时也是电压与电流的相位差，可以反映对应电路的性质。当 $\varphi>0$ 时，电压相位超前电流，电路呈感性；当 $\varphi<0$，电压滞后电流，电路呈容性；当 $\varphi=0$，电压与电流同相，电路呈阻性。



（a）无源二端网络　（b）阻抗符号　（c）相量图

图 3.12　无源二端网络及其等效电路

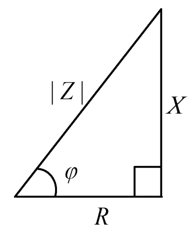


图 3.13　阻抗三角形

阻抗模$|Z|$与其电阻部分 R、电抗部分 X 可以构成直角三角形关系，如图 3.13 所示，称为阻抗三角形。

2．阻抗的串并联

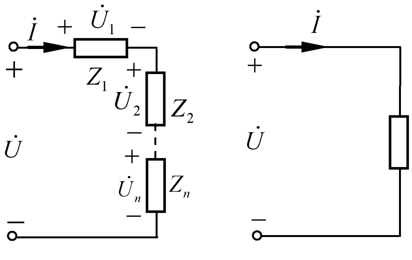
在交流电路中，阻抗的连接可以有多种形式，其中最简单和常用的是串联与并联。阻抗的串并联分析方法与电阻的串并联分析方法相似，但计算时必须按复数运算的方法进行运算。

当 n 个阻抗如图 3.14（a）所示串联时，等效阻抗 Z 为

$$Z = Z_1 + Z_2 + \cdots + Z_n = \sum_{i=1}^{n} Z_i = \sum_{i=1}^{n} R_i + \sum_{i=1}^{n} X_i \tag{3-52}$$

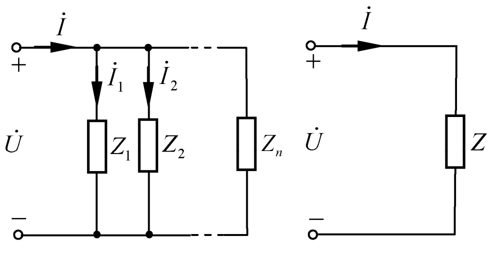
当 n 个阻抗如图 3.15（a）所示并联时，等效阻抗满足

$$\frac{1}{Z} = \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} + \cdots + \frac{1}{Z_n} = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{Z_i} \tag{3-53}$$



（a）阻抗串联　（b）等效阻抗

图 3.14　阻抗的串联电路



（a）阻抗并联　（b）等效阻抗

图 3.15　阻抗的并联电路

当两个阻抗并联时，它的等效阻抗为

$$Z = \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2} \tag{3-54}$$

例 3.11　如图 3.15（a）所示电路，已知 $Z_1 = (3 + \mathrm{j}4)\Omega$，$Z_2 = (8 - \mathrm{j}6)\Omega$，$\dot{U} = 220\angle 0^\circ \mathrm{V}$。试求电路中的电流，并画出相量图。

解：$Z = \dfrac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2} = \dfrac{(3+\mathrm{j}4)\times(8-\mathrm{j}6)}{(3+\mathrm{j}4)+(8-\mathrm{j}6)} = 4.47\angle 26.5^\circ\ \Omega$

$$\dot{I}=\frac{\dot{U}}{Z}=\frac{220\angle 0^\circ}{4.47\angle 26.5^\circ}=49.2\angle -26.5^\circ\ \text{A}$$

$$\dot{I}_1=\frac{\dot{U}}{Z_1}=\frac{220\angle 0^\circ}{3+\text{j}4}=44\angle -53^\circ\ \text{A}$$

$$\dot{I}_2=\frac{\dot{U}}{Z_2}=\frac{220\angle 0^\circ}{8-\text{j}6}=22\angle 37^\circ\ \text{A}$$

相量图如图 3.16 所示。

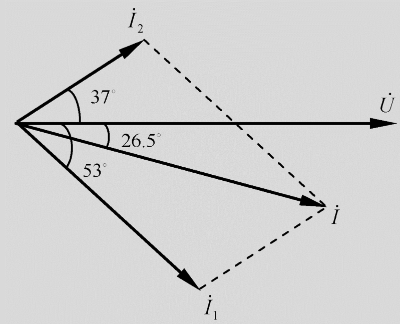


图 3.16　例 3.11 相量图

3.4.3　RLC 串联交流电路

电阻、电感与电容组成的串联交流电路如图 3.17（a）所示。对应的相量模型如图 3.17（b）所示。

设 $\dot{I}=I\angle 0^\circ$ 为参考相量。根据相量形式的欧姆定律，则

$$\dot{U}_\text{R}=R\dot{I}=RI\angle 0^\circ=U_\text{R}\angle 0^\circ$$

$$\dot{U}_\text{L}=\text{j}X_\text{L}\dot{I}=\text{j}X_\text{L}I\angle 0^\circ=X_\text{L}I\angle 90^\circ=U_\text{L}\angle 90^\circ$$

$$\dot{U}_\text{C}=-\text{j}X_\text{C}\dot{I}=-\text{j}X_\text{C}I\angle 0^\circ=X_\text{C}I\angle -90^\circ=U_\text{C}\angle -90^\circ$$

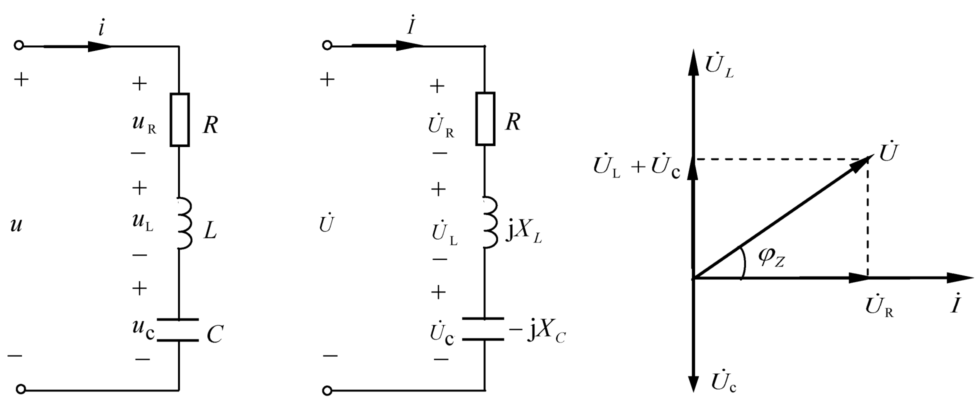
根据基尔霍夫电压定律，有

$$\dot{U}=\dot{U}_\text{R}+\dot{U}_\text{L}+\dot{U}_\text{C}=R\dot{I}+\text{j}X_\text{L}\dot{I}-\text{j}X_\text{C}\dot{I}=\left[R+\text{j}(X_\text{L}-X_\text{C})\right]\dot{I}=Z\dot{I} \tag{3-55}$$

所以 RLC 串联电路的复阻抗为

$$Z=R+\text{j}(X_\text{L}-X_\text{C})=R+\text{j}X=|Z|\angle\varphi \tag{3-56}$$

RLC 串联电路在 $X_\text{L}>X_\text{C}$ 时的相量图如图 3.17（c）所示。$\dot{U}$、$\dot{U}_\text{R}$ 和 $\dot{U}_\text{X}=\dot{U}_\text{L}+\dot{U}_\text{C}$ 构成电压三角形，它与图 3.13 所示的阻抗三角形为相似三角形。



（a）电路图　　（b）相量模型　　（c）相量图

图 3.17　RLC 串联电路

由于

$$\varphi = \arctan\frac{U_L - U_C}{U_R} = \arctan\frac{X_L - X_C}{R} \tag{3-57}$$

所以电压 u 与电流 i 的相位差角 φ 的大小和正负完全由电路的元件参数和电源频率来决定。电抗的正负决定了电路的性质。如果 $X_L > X_C$，则电路呈感性；如果 $X_L < X_C$，则电路呈容性；而当 $X_L = X_C$ 时，电路呈纯电阻性。

例 3.12 日光灯管与镇流器串联到交流电源上，可看作 RL 串联电路，如图 3.18 所示。已知灯管的等效电阻 $R_1 = 280\Omega$，镇流器的电阻和电感分别为 $R_2 = 20\Omega$ 和 $L = 1.65\text{H}$。电源电压 $U = 220\text{V}$，50Hz。试求电流 I，灯管两端电压 U_1 及镇流器两端电压 U_2。

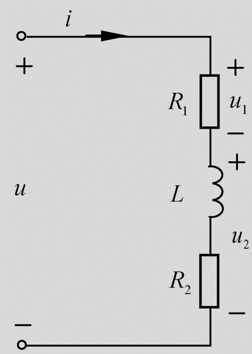


图 3.18　例 3.12 图

解：$X_L = \omega L = 2\times 3.14\times 50\times 1.65 = 518.1\Omega$

串联电路的总阻抗为

$$Z = (R_1 + R_2) + jX_L = (280 + 20) + j518.1 = 598.69\angle 59.93°\Omega$$

设 $U = 220\angle 0°$，则

$$\dot{I} = \frac{220\angle 0°}{598.69\angle 59.63°} = 0.367\angle -59.93°\text{A}$$

$$\dot{U}_1 = R_1\dot{I} = 280\times 0.367\angle -59.93°\text{A} = 102.76\angle -59.93°\text{V}$$

$$\dot{U}_2 = (R_2 + jX_L)\dot{I} = (20 + j518.1)\times 0.367\angle -59.93°\text{A}$$
$$= 190.28\angle 27.86°\text{V}$$

所以电流 I 为 0.367A，电压 U_1 及 U_2 分别为 102.76V 和 190.28V。

3.4.4　交流电路的谐振

在具有电感和电容元件的正弦交流电路中，电路两端的电压与电流一般是不同相的。由于感抗和容抗都是频率的函数，改变电路元件的参数值或调节电源的频率，有可能使电路的电压与电流同相，整个电路呈现纯阻性，这种现象称为谐振。谐振可分为串联谐振和并联谐振。

1. 串联谐振

RLC 串联电路如图 3.17（a）所示，它的阻抗为

$$Z = R + j(X_L - X_C) = R + j(\omega L - \frac{1}{\omega C})$$

如果

$$X_L - X_C = \omega L - \frac{1}{\omega C} = 0 \tag{3-58}$$

则阻抗角

$$\varphi = \arctan\frac{X_L - X_C}{R} = 0$$

即电源电压与电流同相，发生谐振现象。因为发生在串联电路中，因此称为串联谐振。

式（3-58）是发生串联谐振的条件，此时电源的频率称为谐振频率，则

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \tag{3-59}$$

或

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \tag{3-60}$$

由式（3-59）可知，当电源频率 f 与电路参数 L 和 C 之间满足上式关系时，电路发生谐振，谐振可通过改变电源频率和电路参数来实现。

串联谐振具有以下特点。

（1）电路呈纯阻性，阻抗最小，电流最大。

谐振发生时，因 $X_L = X_C$，所以，阻抗的模 $|Z| = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = R$ 达到最小值，电路呈电阻性。电压 U 不变的情况下，电路中的电流 I 达到最大值，谐振电流 $I_0 = \frac{U}{R}$。图 3.19 为 RLC 串联谐振电路的阻抗随频率变化的特性曲线。图 3.20 为在电压 U 不变的情况下回路电流随频率 f 而变化的关系曲线。

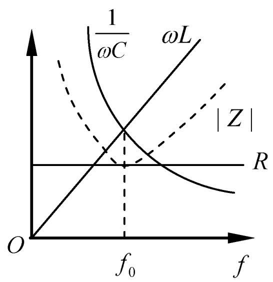


图 3.19　阻抗随频率变化的特性曲　线

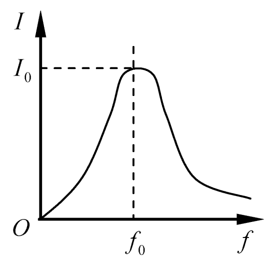


图 3.20　电流随频率变化的关系曲线

（2）电阻电压等于电源电压，电感、电容上的电压大小相等、方向相反。

由于 $X_L = X_C$，所以 $U_L = U_C$，而 $\dot{U}_L$ 和 $\dot{U}_C$ 的相位相反，相加时互相抵消，所以电阻上的电压等于电源电压，即

$$U_R = I_0 R = U \tag{3-61}$$

电感和电容上的电压分别为

$$U_L = I_0 X_L = QU \tag{3-62}$$

$$U_X = I_0 X_C = QU \tag{3-63}$$

其中 $Q = \frac{U_L}{U} = \frac{U_C}{U} = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{\omega_0 CR}$ 称为 RLC 串联电路的品质因数，Q 是一个无量纲的量，它的大小反映了谐振电路的性能。在感抗和容抗远远大于电阻时，Q 远远大于 1，根据式（3-62）和式（3-63）可得

$$U_L = U_C = QU >> U \tag{3-64}$$

式（3-64）说明，发生串联谐振时，有可能会出现电感电压 U_L（电容电压 U_C）远远大于电源电压 U 的现象，因此，串联谐振又称为电压谐振。

串联谐振在电力工程中应尽力避免，以防高电压损坏电气设备。但在无线电工程中，串联谐振却被广泛用于调谐选频。

2．并联谐振

实际 RLC 并联谐振电路由线圈和电容构成，如图 3.21 所示。它的阻抗为

$$Z=\frac{(R+\mathrm{j}\omega L)\dfrac{1}{\mathrm{j}\omega C}}{(R+\mathrm{j}\omega L)+\dfrac{1}{\mathrm{j}\omega C}}=\frac{R+\mathrm{j}\omega L}{1+\mathrm{j}\omega RC-\omega^2 LC} \tag{3-65}$$

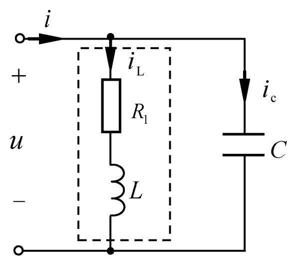


图 3.21　RLC 并联电路

通常电感线圈的内阻 R 很小，一般在谐振时 $\omega L >> R$，则上式可表示为

$$Z\approx\frac{\mathrm{j}\omega L}{1+\mathrm{j}\omega RC-\omega^2 LC}=\frac{1}{\dfrac{RC}{L}+\mathrm{j}(\omega C-\dfrac{1}{\omega L})} \tag{3-66}$$

发生谐振时

$$\omega_0 C=\frac{1}{\omega_0 L} \tag{3-67}$$

谐振频率为

$$\omega=\omega_0=\frac{1}{\sqrt{LC}} \tag{3-68}$$

或

$$f=f_0=\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \tag{3-69}$$

并联谐振具有以下特点。

（1）电路呈阻性，阻抗最大，电流最小。

发生并联谐振时的电路阻抗值为

$$|Z|=|Z_0|=\frac{1}{\dfrac{RC}{L}}=\frac{L}{RC} \tag{3-70}$$

并联谐振时的电流为

$$I=I_0=\frac{U}{|Z_0|}=\frac{U}{L}RC \tag{3-71}$$

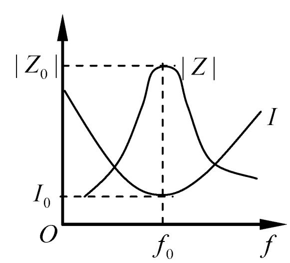


图 3.22　并联谐振的特性曲线

并联谐振电路的$|Z|$、I 随 f 变化的特性曲线如图 3.22 所示。

（2）可能出现过电流现象。由于 $\omega_0 L >> R$，所以当电路谐振时，电感上的电流 I_L 和电容上的电流 I_C 的大小关系为

$$I_L\approx I_C=\frac{U}{\omega_0 L}=\omega_0 CU \tag{3-72}$$

又因为，$\dot{I}_L$ 与 $\dot{I}_C$ 的相位几乎相反，且 $I=I_0=\dfrac{U}{L}RC$，所以，

各支路电流与总电流之比为

$$\frac{I_L}{I_0} \approx \frac{I_C}{I_0} = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{\omega_0 CR} = Q \tag{3-73}$$

式（3-73）表明，并联谐振时，支路电流是总电流的 Q 倍。而 R 总是远远小于 $\omega_0 L$，所以 $I_L = I_C = QI >> I$，因此，并联谐振又称电流谐振。

并联谐振在无线电和工业电子技术中应用广泛，例如利用并联谐振时阻抗模高的特点来选择信号或消除干扰。

例 3.13　电路如图 3.23 所示，若无论电源频率为何值，电压 u 与电流 i 都同相，则电路参数应满足什么条件？

解：要实现电压与电流同相位，则需使电路发生谐振，满足

$$Z = \frac{(R_1 + j\omega L)(R_2 + 1/j\omega C)}{R_1 + j\omega L + R_2 + 1/j\omega C} = R$$

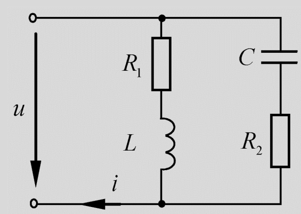


图 3.23　例 3.13 图

由此得

$$R_1 R_2 + \frac{L}{C} + \mathrm{j}\left(R_2 \omega L - \frac{R_1}{\omega C}\right) = R(R_1 + R_2) + \mathrm{j}R\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)$$

令实部与虚部分别相等，即

$$R_1 R_2 + \frac{L}{C} = R(R_1 + R_2) \tag{3-74}$$

$$R_2 \omega L - \frac{R_1}{\omega C} = R\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) \tag{3-75}$$

要使式（3-75）对任意频率都成立，需 $R = R_1 = R_2$。将其代入式（3-74）可得，$R = \sqrt{L/C}$。即当满足 $R = R_1 = R_2 = \sqrt{L/C}$ 时，电路对任意频率的信号都发生谐振，电压 u 与电流 i 都同相。

3.5　交流电路的功率

3.5.1　瞬时功率

正弦交流电路中，电压和电流是随时间变化的正弦量，因此功率和能量也是瞬时变化的，交流电路中的功率比直流电路中的功率要复杂得多。

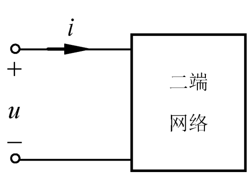


图 3.24　二端网络

如图 3.24 所示正弦交流电路，二端网络端口电压和电流为关联参考方向。设

$$i = I_m \sin \omega t = \sqrt{2} I \sin \omega t \tag{3-76}$$

$$u = U_m \sin(\omega t + \varphi) = \sqrt{2} U \sin \omega t(\omega t + \varphi) \tag{3-77}$$

则二端网络在任一瞬间吸收的瞬时功率为

$$p = ui = U_m I_m \sin(\omega t + \varphi) \sin \omega t = UI \cos \varphi - UI \cos(2\omega t + \varphi) \tag{3-78}$$

其中，当 $p>0$ 时，二端网络吸收功率；当 $p<0$ 时，二端网络释放功率。

3.5.2　有功功率与功率因数

瞬时功率在一个周期内的平均值，称为平均功率，用大写字母 P 表示，即

$$P=\frac{1}{T}\int_0^T p\mathrm{d}t=\frac{1}{T}\int_0^T ui\mathrm{d}t \tag{3-79}$$

平均功率代表了电路实际所消耗的功率，又称有功功率，单位是瓦特（W）。通常所说的功率都是指有功功率。对于上述二端网络，其有功功率为

$$P=\frac{1}{T}\int_0^T p\mathrm{d}t=\frac{1}{T}\int_0^T UI\left[\cos\varphi-\cos(2\omega t+\varphi)\right]\mathrm{d}t=UI\cos\varphi \tag{3-80}$$

由此可见，正弦交流电路的有功功率不但与电压、电流的有效值有关，还与阻抗角有关。有功功率表达式中的 $\cos\varphi$ 表示了功率的利用程度，称为功率因数，用 λ 表示，即

$$\lambda=\cos\varphi \tag{3-81}$$

其中，$\varphi=\varphi_u-\varphi_i$ 为电压与电流的相位差，也即阻抗角，又称为功率因数角。

从图 3.13 所示阻抗三角形可知 $\cos\varphi=R/|Z|$，所以有功功率为

$$P=UI\cos\varphi=\frac{UR}{|Z|}I=I^2R=U_RI \tag{3-82}$$

因此，有功功率就是消耗在电阻上的功率。

对于电阻元件，阻抗角 $\varphi=0$，有功功率为

$$P_{\mathrm{R}}=UI\cos 0=UI=I^2R=\frac{U^2}{R} \tag{3-83}$$

对于电感元件，阻抗角 $\varphi=90°$，有功功率为

$$P_{\mathrm{L}}=UI\cos 90°=0 \tag{3-84}$$

对于电容元件，阻抗角 $\varphi=-90°$，有功功率为

$$P_{\mathrm{C}}=UI\cos(-90°)=0 \tag{3-85}$$

上述结果表明，电阻元件始终是在消耗有功功率，而电感元件和电容元件实际是不消耗有功功率的。有功功率是反映电路实际消耗功率情况的，电路总的有功功率也就是消耗在电路各电阻上的有功功率之和。

3.5.3　无功功率

电路中的电感、电容实际不消耗能量，但在电感、电容和电源之间存在着能量转移，这种能量交换规模的大小，用无功功率 Q 表示，其定义式为

$$Q=UI\sin\varphi \tag{3-86}$$

无功功率的单位为乏（var）。

电阻元件的无功功率为

$$Q_{\mathrm{R}}=0 \tag{3-87}$$

电感元件的无功功率为

$$Q_L = UI = \omega LI^2 = \frac{U^2}{\omega L} \tag{3-88}$$

电容元件的无功功率为

$$Q_C = -UI = -\omega CU^2 = -\frac{I^2}{\omega C} \tag{3-89}$$

由式（3-88）和式（3-89）可以看出，电感吸收的无功功率为正，电容吸收的无功功率为负。对于感性电路来说，其电压超前电流，无功功率 $Q > 0$；对于容性电路来说，其电压滞后电流，无功功率 $Q < 0$。同一电路中，感性和容性元件的无功功率可以相互补偿。

3.5.4　视在功率

交流电路中电压与电流有效值的乘积，称为视在功率，用符号 S 表示，即

$$S = UI = \frac{1}{2}U_m I_m = |Z| I^2 \tag{3-90}$$

视在功率常用来表示电源设备的容量，表示它能向负载提供的最大功率，其单位是伏安（VA）。

有功功率 P、无功功率 Q 和视在功率 S 三者之间的关系为

$$P = UI\cos\varphi = S\cos\varphi$$

$$Q = UI\sin\varphi = S\sin\varphi$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

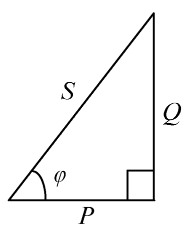


图 3.25　功率三角形

三者可构成一个直角三角形，称为功率三角形，如图 3.25 所示。功率三角形和阻抗三角形是相似的，可以用以帮助记忆和简化交流电路的分析与计算。

例 3.14 如图 3.17（a）所示，在电阻、电感、电容元件相串联的电路中，已知：R=30Ω，L=127mH，C=40μF，电源电压 $u = 220\sqrt{2}\sin(314t + 20°)\text{V}$。试求：

（1）感抗、容抗和阻抗；

（2）电流的有效值 I 与瞬时值 i 的表达式；

（3）各部分电压的有效值与瞬时值的表达式；

（4）作相量图；

（5）P、Q、S 和 λ。

解：（1）$X_L = \omega L = 314 \times 127 \times 10^{-3} = 40\Omega$

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{314 \times 10 \times 10^{-6}} = 80\Omega$$

$$Z = R + \text{j}(X_L - X_C) = 30 + \text{j}(40 - 80) = 30 - \text{j}40 = 50\angle -53°\ \Omega$$

（2）$\dot{U} = 220\angle 20°\ \text{V}$

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}}{Z} = \frac{220\angle 20°}{50\angle -53°} = 4.4\angle 73°\ \text{A}$$

即电流有效值为 4.4A。电流瞬时表达式为

$$i = 4.4\sqrt{2}\sin(314t + 73°)\ \text{A}$$

（3）$\dot{U}_R = R\dot{I} = 30\times 4.4\angle 73^\circ = 132\angle 73^\circ$ V

$U_R = 132$V

$u_R = 132\sqrt{2}\sin(314t + 73^\circ)$V

$\dot{U}_L = jX_L\dot{I} = j40\times 4.4\angle 73^\circ = 176\angle 73^\circ + 90^\circ = 176\angle 163^\circ$ V

$U_L = 176$V

$u_L = 176\sqrt{2}\sin(314t + 163^\circ)$V

$\dot{U}_C = -jX_C\dot{I} = -j80\times 4.4\angle 73^\circ = 352\angle 73^\circ - 90^\circ = 352\angle -17^\circ$ V

$U_C = 352$V

$u_C = 352\sqrt{2}\sin(314t - 17^\circ)$V

（4）相量图如图 3.26 所示。

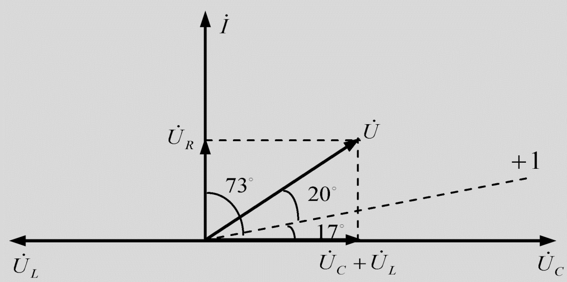


图 3.26　例 3.14 相量图

（5）$P = UI\cos\varphi = 220\times 4.4\times\cos\varphi(-53^\circ) = 220\times 4.4\times 0.6 = 580.8$W

$Q = UI\sin\varphi = 220\times 4.4\times\sin(-53^\circ) = 220\times 4.4\times(-0.8) = -774.4$ var

$S = UI = 220\times 4.4 = 968$VA

$\lambda = \cos\varphi = 0.6$

例 3.15 如图 3.27（a）所示二端网络，已知端口电流 $i = 5\sqrt{2}\sin(200t + 23.13^\circ)$A，求二端网络的 P、Q、S 和 λ。

解：相量模型如图 3.27（b）所示，其等效阻抗为

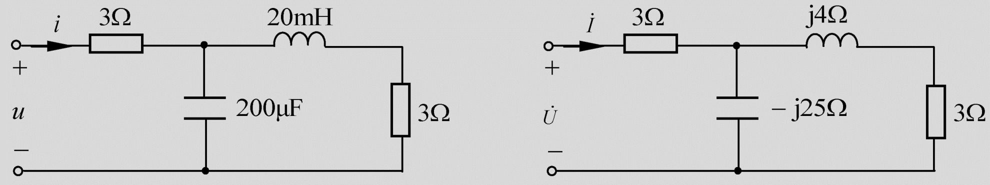
$$Z = 3 + \frac{(3 + j4)\times(-j25)}{(3 + j4) + (-j25)} = 7.16 + j4.16 = 8.28\angle 30.16^\circ\ \Omega$$

$$P = UI\cos\varphi = I^2|Z|\cos\varphi = I^2\,\mathrm{Re}\,Z = 5^2\times 7.16 = 179\text{W}$$

$$Q = UI\sin\varphi = I^2|Z|\sin\varphi = I^2\,\mathrm{Im}\,Z = 5^2\times 4.16 = 104\ \text{var}$$

$$S = UI = I^2|Z| = 5^2\times 8.28 = 207\text{VA}$$

$$\lambda = \cos\varphi = \cos 30.16^\circ = 0.86$$



（a）二端网络　　（b）相量模型

图 3.27　例 3.15 图

例 3.16 一个线圈接在 50Hz、220V 的交流电源上。测得线圈的功率为 20W，电流为 0.5A。线圈的等效电路可看作是电阻和电感串联而成的，求线圈的等效电阻和等效电感。

解：因为功率表测得的是有功功率，电流表测得的是电流有效值，故线圈等效电阻为

$$R = \frac{P}{I^2} = \frac{20}{0.5^2} = 80\Omega$$

线圈的等效阻抗模为

$$|Z| = \frac{U}{I} = \frac{220\text{V}}{0.5\text{A}} = 440\Omega$$

线圈的等效感抗

$$X_{\text{L}} = \sqrt{|Z|^2 - R^2} = \sqrt{440^2 - 80^2} = 433\Omega$$

故线圈等效电感为

$$L = \frac{X_{\text{L}}}{\omega} = \frac{433}{2\times 3.14\times 50}\text{H} = 1.38\text{H}$$

3.5.5　功率因数的提高

在交流供电线路上，接有各种各样的负载，它们的功率因数取决于负载本身的参数。电阻负载（例如白炽灯、电阻炉等）的电压和电流同相，其功率因数为 1。工程上的多数负载为感性负载，这就造成了电力用户的功率因数小于 1。由于电源设备的容量就是视在功率 UI，而输出的有功功率却为 $UI\cos\varphi$，因此，为了充分利用电源设备的容量，就要求提高电路的功率因数 $\lambda = \cos\varphi$。

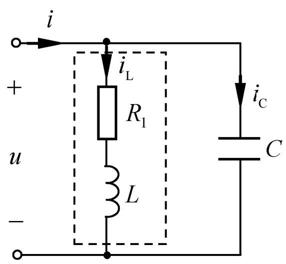
如容量 1000kVA 的发电机，若负载功率因数 $\lambda = 1$，此发电机就能输出 1000W 的有功功率；若负载功率因数 $\lambda = 0.7$，则该发电机只能输出 700W 的有功功率，也就是说发电机的容量没有被充分利用。提高功率因数，可以提高发电和变电设备的利用率。

另一方面，提高功率因数也可以减小供电系统的功率损耗。当发动机的额定电压和输出功率一定时，功率因数越大，输电线路电流 $I = \dfrac{P}{U\cos\varphi}$ 就越小，消耗在输电线路（等效电阻 R_{l}）上的功率 $\Delta p = I^2 R_{\text{l}}$ 就越小。

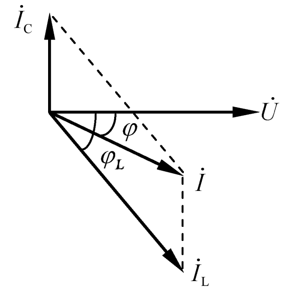
为了提高电网的经济运行水平，充分发挥设备潜力，减少线路功率损耗，提高供电质量，国家供用电规则对不同的用电大户的功率因数指标制订了明确标准，高压电用户必须

保证功率因数在 0.95 以上，其他用户应保证在 0.9 以上。凡用户实际月平均功率因数低于指标的，供电部门将对其处以罚款；长期低于指标又不增添无功补偿设备的，供电部门可停止或限制供电。

功率因数不高的根本原因是大量感性负载的存在。感性负载的功率因数之所以小于 1，是由于负载本身需要一定的无功功率。感性无功功率可以用容性无功功率进行补偿。故提高功率因数的常用方法是在供电线路或感性负载两端并联电力电容器，使总无功功率减小，从而提高供电线路的功率因数。其电路图和相量图如图 3.28 所示。



（a）电路图



（b）相量图

图 3.28　电容器与感性负载并联提高功率因数

并联电容器以前，电路总电流 $\dot{I}=\dot{I}_L$；并联电容器以后，因为所加电压和负载参数没有改变，感性负载的电流 $I_L=\dfrac{U}{\sqrt{R^2+X_L^{\ 2}}}$ 和功率因数 $\cos\varphi_L=\dfrac{R}{\sqrt{R^2+X_L^{\ 2}}}$ 均未变化。但电压 u 和线路电流 i 之间的相位差 φ 变小了，即 $\cos\varphi$ 变大了。同时，线路电流也减小了，因而减小了功率损耗。

应该注意，并联电容器提高功率因数是对整个电路而言，感性负载的电压、电流、功率和功率因数均没有改变。

下面分析选择并联电容值的问题。如图 3.28（b）所示，电流之间满足基尔霍夫电流定律 $\dot{I}=\dot{I}_L+\dot{I}_C$。由 $P=UI\cos\varphi$，可得出电容电流的有效值为

$$
\begin{aligned}
I_C &= I_L\sin\varphi_L - I\sin\varphi \\
&= \frac{P}{U\cos\varphi_L}\sin\varphi_L - \frac{P}{U\cos\varphi}\sin\varphi = \frac{P}{U}(\tan\varphi_L - \tan\varphi)
\end{aligned}
$$

又因为

$$I_C=\frac{U}{X_C}=\omega CU$$

故

$$\omega CU=\frac{P}{U}(\tan\varphi_L-\tan\varphi)$$

所以并联电容值为

$$C=\frac{P}{\omega U^2}(\tan\varphi_L-\tan\varphi) \tag{3-91}$$

例 3.17 有一感性负载，其功率 P=10kW，功率因数$\cos\varphi_L = 0.6$，接在电压 U=220V 的电源上，电源频率 f=50Hz。试求：

（1）如要将功率因数提高到$\cos\varphi = 0.95$，求与负载并联的电容器的电容值和电容器并联前后的线路电流。

（2）如要将功率因数从 0.95 再提高到 1，问并联电容器的电容值还需增加多少？

解：（1） $\cos\varphi_L = 0.6$，即 $\varphi_L = 53^\circ$

$\cos\varphi = 0.95$，即 $\varphi = 18^\circ$

所需并联电容器的电容值为

$$C = \frac{P}{\omega U^2}(\tan\varphi_L - \tan\varphi) = \frac{10\times10^3}{2\pi\times50\times220^2}(\tan53^\circ - \tan18^\circ) = 656\mu F$$

并联电容器之前线路电流（即负载电流）为

$$I_L = \frac{P}{U\cos\varphi_L} = \frac{10\times10^3}{220\times0.6} = 75.6A$$

并联电容器之后线路电流为

$$I = \frac{P}{U\cos\varphi} = \frac{10\times10^3}{220\times0.95} = 47.8A$$

（2）如要将功率因数从 0.95 再提高到 1，则所需增加的电容值为

$$C = \frac{P}{\omega U^2}(\tan\varphi_L - \tan\varphi) = \frac{10\times10^3}{2\pi\times50\times220^2}(\tan18^\circ - \tan0^\circ) = 213.6\mu F$$

可见在功率因数已经接近 1 时再继续提高，则所需的电容值是很大的，因此一般不必提高到 1。

例 3.18 某电源的额定容量$S_N = 20kVA$，额定电压$U_N = 220V$，频率 50Hz。试求：

（1）该电源的额定电流；

（2）若该电源给$\cos\varphi_1 = 0.5$、40W、220V 的日光灯供电，最多可点多少盏灯？此时线路电流是多少？

（3）若将电路的功率因数提高到$\cos\varphi_2 = 0.9$，此时线路电流是多少？需要并联多大电容？

解：（1）额定电流为

$$I_N = \frac{S_N}{U_N} = \frac{20\times10^3}{220}A = 91A$$

（2）设日光灯的盏数为 n，则 $nP_1 = S_N\cos\varphi_1$，故

$$n = \frac{S_N\cos\varphi_1}{P_1} = \frac{20\times10^3\times0.5}{40} = 250$$

此时线路电流为额定电流，即$I = 91A$。

（3）因电路总的有功功率 $P = nP_1 = 10\text{kW}$，故将功率因数提高到 0.9 时的线路电流为

$$I = \frac{P}{U_N \cos\varphi_2} = \frac{10 \times 10^3}{220 \times 0.9} = 50.5\text{A}$$

因为 $\cos\varphi_1 = 0.5$，$\cos\varphi_2 = 0.9$，所以 $\tan\varphi_1 = 1.732$，$\tan\varphi_2 = 0.48$。提高功率因数所需并联电容值为

$$C = \frac{P}{2\pi f U^2}(\tan\varphi_1 - \tan\varphi_2) = \frac{10 \times 10^3}{2 \times 3.14 \times 50 \times 220^2}(1.732 - 0.48) \approx 823\mu\text{F}$$

3.6 应用举例

例 3.19 一台家用洗衣机，工作时功率（平均功率）为 240W，$\cos\varphi = 0.5$。试求其电流 I 及无功功率 Q，视在功率 S；将其等效为电阻和电感串联的电路，求其 R 和 $|Z|$ 值。

解：根据有功功率公式

$$I = \frac{P}{U\cos\varphi} = \frac{240}{220 \times 0.5} = 2.18\text{A}$$

$$\sin\varphi = \sqrt{1 - \cos\varphi^2} = 0.866$$

$$Q = UI\sin\varphi = 220 \times 2.18 \times 0.866 = 415.5\text{var}$$

$$S = UI = 480\text{VA}$$

$$R = \frac{P}{I^2} = \frac{240}{2.18^2} = 50.5\Omega$$

$$|Z| = \frac{U}{I} = \sqrt{R^2 + X_L^2} = \frac{220}{2.18} = 100.9\Omega$$

例 3.20 图 3.29 所示电路是利用功率表、电流表、电压表测量交流电路参数的方法，功率表读数为 940W，电压表读数为 220V，电流表读数为 5A，电源频率为 50Hz，试求线圈的 R 和 L 数值。

解：$$R = \frac{P}{I^2} = \frac{940}{5^2} = 37.6\Omega$$

$$|Z| = \frac{U}{I} = \frac{220}{5} = 44\Omega$$

$$X_L = \sqrt{|Z|^2 - R^2} = \sqrt{44^2 - 37.6^2} = 22.85\Omega$$

$$L = \frac{X_L}{\omega} = \frac{22.85}{2\pi f} = 73\text{mH}$$

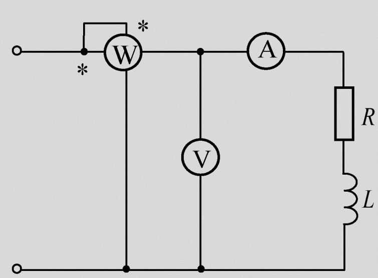


图 3.29　例 3.20 图

例 3.21 图 3.30 所示电路，电压 U 为 220V，由一只电炉和一台满载电动机并联，电炉为纯电阻，负载 R=30Ω，电动机为感性负载，其额定功率 P=13.2kW，$\cos\varphi = 0.8$，求总电流。

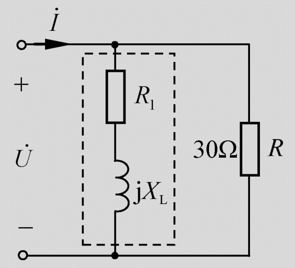


图 3.30 例 3.21 图

解：设 $\dot{U} = 220\angle 0^\circ$ V

$$\dot{I}_R = \frac{\dot{U}}{R} = \frac{220\angle 0^\circ}{30} = 7.33\angle 0^\circ \text{ A}$$

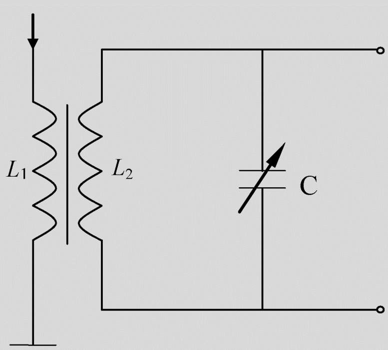
$$I_L = \frac{P}{U\cos\varphi} = \frac{13200}{220\times 0.8} = 75\text{A}$$

由 $\cos\varphi = 0.8$ 可得 $\varphi = 37^\circ$，则

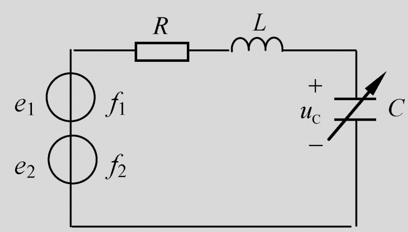
$$\dot{I}_L = 75\angle -37^\circ \text{ A}$$

$$\dot{I} = \dot{I}_L + \dot{I}_R = 75\angle -37^\circ + 7.33\angle 0^\circ = 67.33 - j45 = 81\angle -33.8^\circ \text{ A}$$

例 3.22 串联谐振在无线电工程中的应用很多，例如在接收机里被用来选择信号。如图 3.31 所示是一个接收机的输入电路及其等效电路，显然，对信号而言，R，L，C 形成一个串联电路。从天线所接收到的许多频率不同的电台信号经天线线圈 L_1 耦合到调谐回路 LC 并感应出相应的电动势 e_1，e_2…，图中 R 是线圈 L 的电阻，改变电容量 C，对所需频率产生串联谐振。于是在 LC 回路中，该频率的电流最大，在电容两端就会得到最高的电压。其他电台频率的信号，虽然也会在接收回路中出现，但因未达到谐振频率，引起的电流很小。这样就起到选择信号和抑制干扰的作用。



（a）接收机的输入电路



（b）等效电路

图 3.31 例 3.22 图

例 3.23 某收音机输入回路 L=0.3mH，R=10Ω，为收到 560kHz 信号，如图 3.32 所示。试求：

（1）调谐电容 C 值；

（2）如输入电压为 1.5μV，求谐振电流和此时的电容电压。

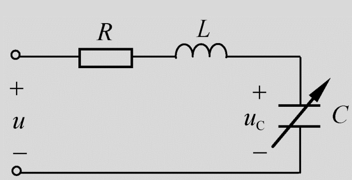


图 3.32 例 3.23 图

解：(1) $C = \dfrac{1}{(2\pi f)^2 L} = 269\text{pF}$

（2）$I_0=\dfrac{U}{R}=\dfrac{1.5}{10}=0.15\mu\,\text{A}$

$U_C=I_0X_C=158.5\mu\,\text{V}$

例 3.24 一接收器的电路参数为 U_s=10V, $\omega=5\times10^3\,\text{rad/s}$,调 C 使电路中的电流最大，I_{max}=200mA，测得电容电压为 600V，如图 3.33 所示。求 R、L、C 及 Q。

解：$R=\dfrac{U}{I_0}=\dfrac{10}{200\times10^{-3}}=50\Omega$

$U_C=QU\Rightarrow Q=\dfrac{U_C}{U}=\dfrac{600}{10}=60$

$L=\dfrac{RQ}{\omega_0}=\dfrac{50\times60}{5\times10^3}=60\text{mH}$

$C=\dfrac{1}{\omega_0^2L}=6.67\mu\text{F}$

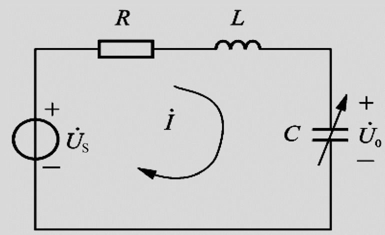


图 3.33　例 3.24 图

例 3.25 日光灯点亮的工作过程：当电路接通时，电源电压（220V）全部加在启辉器静触片和双金属片两极间，高压产生强电流使氖气放电（红色辉光），使其 U 形双金属片受热膨胀与静触极接触，使灯丝、启辉器、镇流器和电源构成一个闭合回路，灯丝通过电流被加热后产生热电子发射，释放大量电子，致使管内氩气电离，水银蒸发为水银蒸汽，为灯管导通创造了条件。由于启辉器玻璃泡内两电极的接触，电场消失，使氖其停止放电。从而玻璃泡内温度下降，双金属片因冷却而恢复原来状态，致使启辉电路断开。瞬间，电路中电流突然中断，使镇流器两端产生一个比电源电压高得多的感应电动势，同时与电源电压叠加在灯管两端，使灯管两端电极之间形成一个强电场。灯丝阴极发射的电子在强电场的作用下，引起管内汞蒸汽电离而形成弧光放电，同时产生大量的紫外线激发管壁的荧光粉而发出可见光。灯管电流在不断增大，此时，镇流器的阻抗将灯管电流限制和稳定在正常工作数值上。灯管启动后，感应电动势消失，是靠电源电压和镇流器维持灯管的正常工作。启辉器在电路中只起控制灯管预热电流的时间和断开电路时使镇流器产生感应电动势的作用，在日光灯正常工作时，启辉器是停止工作的。

日光灯等效电路如图 3.34 所示，电源为 50Hz、220V 交流电，已知：灯管电阻 R_1=292Ω 镇流器 R_2=40.6Ω，L=1.57H，求：电路阻抗，电流 I，电压 U_1、U_2 及电路的有功功率、无功功率和视在功率。

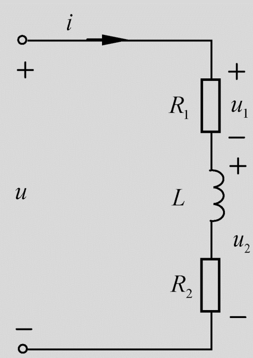


图 3.34　例 3.25 图

解：$Z=\sqrt{\left(R_1+R_2\right)^2+X_L}=\sqrt{\left(R_1+R_2\right)^2+(2\pi fL)^2}$
$=594.7\Omega$

$I=\dfrac{U}{|Z|}=\dfrac{220}{594.7}=0.37\text{A}$

$U_1=IR_1=0.37\times292\approx108\text{V}$

$$U_2 = I\sqrt{R_2^2 + (2\pi fL)^2} = 0.37 \times \sqrt{40.6^2 + (2 \times 3.14 \times 50 \times 1.57)^2} = 183\text{V}$$

$$P = I^2(R_1 + R_2) = 0.37^2 \times (292 + 40.6) = 45.5\text{W}$$

$$Q = I^2 X_L = 0.37^2 \times 2 \times 3.14 \times 50 \times 1.57 = 67.5\text{var}$$

$$S = UI = 220 \times 0.37 = 81.4\text{VA}$$

例 3.26 汽车的汽油发动机的启动需要通过点火装置点燃气缸中的燃料空气混合体来完成，该装置称为点火火花塞，其结构是一对具有气隙间隔的电极。当在两个电极间施加高压（通常为几千伏）时，空气气隙电离产生火花点燃发动机。汽车电池电压只有 12V，如何才能产生几千伏的瞬间高压呢？

考虑到电感的电压与电流的变化率成正比，即 $u = L\,\mathrm{d}i/\mathrm{d}t$，可知：若在极短时间内使电感电流发生较大变化，如阶跃性跳变，则电感两端将会产生瞬间的高压脉冲。利用电感产生高压电弧的汽车点火电路如图 3.35 所示。

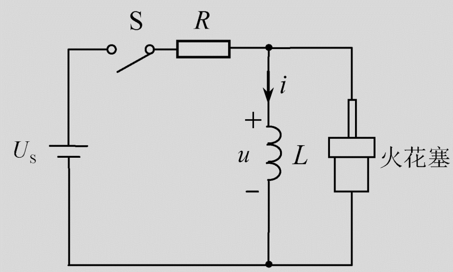


图 3.35　例 3.26 图

在处于点火闲置状态时，开关 S 是闭合的，直流稳态下电感相当于短路，电流 i 为常数 I_0（$I_0=U_0/\text{R}$），电感电压 $u = L\,\mathrm{d}i/\mathrm{d}t = 0$，点火时开关 S 突然断开，电感电流瞬间由 I_0 变为零，产生阶跃变化；而电感电压 $u = L\,\mathrm{d}i/\mathrm{d}t \approx \infty$，形成一个很高的电压脉冲，从而使空气隙中产生电离火花或电弧，实现点火。

本 章 小 结

本章主要介绍正弦交流电路的基本概念和电路分析方法。随时间按正弦规律变化的电压和电流称为正弦量，正弦量的三要素为幅值（最大值、有效值）、频率（角频率、周期）和初相位。正弦量有三角函数式、波形图和相量三种表示方法，其中相量法可以简化计算，用于正弦交流电路的分析和计算。正弦交流电路中节点电流和回路电压满足相量形式的基尔霍夫定律。当在电阻元件、电感元件和电容元件两端加上正弦交流电压时，电压与电流的关系分别为 $\dot{U}_R = R\dot{I}_R$、$\dot{U}_L = \mathrm{j}\omega L\dot{I}_L$ 和 $\dot{U}_C = -\mathrm{j}\dfrac{1}{\omega C}\dot{I}_C$。无源二端网络电压与电流满足相量形式的欧姆定律 $\dot{U} = Z\dot{I}$，Z 被称为阻抗。

在含有电感元件和电容元件的电路中，当电压与电流同相时，电路发生谐振，串联谐振的特点是电路阻抗最小、电流最大，电感和电容两端电压可能大于电源电压；并联谐振的特点是电路阻抗最大、电流最小，可能出现支路电流大于总电流的情况。电路中有功功率（平均功率）为 $P = UI\cos\varphi$，无功功率为 $Q = UI\sin\varphi$，视在功率为 $S = UI$，提高电路的功率因数的方法是在感性负载两端并联合适的电容。

习　题　3

3.1　填空题

（1）在直流电路中，电流的其大小和方向______，而交流电路中电流的大小和方向则是______。

（2）正弦量可以用______函数表示，也可以用______函数表示。

（3）正弦量的三要素是______、_______和_______。

（4）正弦量的周期，用字母______表示，其单位为_______。

（5）正弦量的频率，用字母_______表示，其单位为_____。频率与周期之间的关系为_______。

（6）正弦量的角频率，用字母______表示，其单位为____。角频率与周期之间的关系为_______。

（7）我国工频交流电的频率为______Hz，周期为______s。

（8）正弦量有效值的定义所依据的是正弦量与直流量的________等效，正弦量的有效值与最大值之间的关系为________。某正弦电压为 $u = 380\sin(314t + 45^\circ)\text{V}$，此正弦电压的有效值为_________。

（9）已知两个正弦量的初相位分别为 φ_1、φ_2，当 $\varphi_1 - \varphi_2$ 的值____时，说明第一个正弦量超前第二个正弦量，当 $\varphi_1 - \varphi_2$ 的值_____时，说明第一个正弦量比第二个正弦量滞后。

（10）两个正弦量同相，说明两个正弦量的相位差为_________；两个正弦量反相，说明两个正弦量的相位差为_________；两个正弦量正交，说明两个正弦量的相位差为__________。

（11）正弦量的表示方法有_______、_______和_______三种。

（12）一个正弦量对应的_____一个相量，一个相量可以表示多个不同_____的正弦量。相量的模等于正弦量的_____，幅角等于正弦量的_____。

（13）某正弦电压为 $u = 380\sin(314t + 45^\circ)\text{V}$，此正弦电压对应的相量为_________。

（14）纯电阻正弦交流电路中，电压有效值与电流有效值之间的关系为______，电压与电流在相位上的关系为_________。

（15）在纯电阻正弦交流电路中，已知端电压 $u = 14.14\sin(314t - \pi/6)\text{V}$，电阻 R=10Ω，那么电流 i =______，电压与电流的相位差 φ =_______，电阻上消耗的功率 P=_______。

（16）平均功率是指_________________________________，它又叫做_________。

（17）纯电感正弦交流电路中，电压有效值与电流有效值之间的关系__________，电压与电流在相位上的关系为__________。

（18）感抗与频率成_________比，其值 X_L =________，单位是__________。

（19）在正弦交流电路中，已知流过电感的电流 I =10A，电压 $u = 28.28\sin 1000t\,\text{V}$，则电流 i = ___________，感抗 X_L =________，电感 L=_______，无功功率 Q_L =___________。

（20）纯电容正弦交流电路中，电压有效值与电流有效值之间的关系为__________，电压与电流在相位上的关系为______________。

（21）容抗与频率成______比，其值X_C=_________，单位是__________。

（22）在正弦交流电路中，已知流过电容元件的电流I=10A，电压$u = 28.28\sin 1000t$V，则电流i =__________，容抗X_C=________，电容C=________，无功功率Q_C=__________。

（23）基尔霍夫定律的相量表达式为________________和________________。

（24）无源线性二端网络的复阻抗定义为________________。它不代表__________，不是__________。

（25）电路中出现________________的现象，称为谐振。

（26）串联正弦交流电路发生谐振的条件是_________。谐振时，谐振频率f=________，品质因数Q=_________。

（27）发生串联谐振时，电路中的感抗与容抗____________，此时电路中阻抗___________，电流__________，总阻抗Z=__________。

（28）在 RLC 串联正弦交流电路，用电压表测得电阻、电感、电容上电压均为 10V，用电流表测得电流为 10A，此电路中R=_________，P=_________，Q=________，S=__________。

（29）提高功率因数的意义是为了：___________________和__________________。

（30）感性负载提高功率因数的方法是：____________________。

3.2 已知$u_A = 220\sqrt{2}\sin 314t$V，$u_B = 220\sqrt{2}\sin(314t + 60^\circ)$V

（1）指出各正弦量的幅值、有效值、角频率、初相位、周期、频率以及两个正弦量之间的相位差为多少？

（2）试分别用波形图、相量及相量图表示上述两正弦量。

3.3 两正弦交流电流分别为$i_1 = 3\sin(314t + 30^\circ)$A，$i_2 = 4\sin(314t + 30^\circ)$A，试用相量法及相量图法求$i$=$i_1$+$i_2$的瞬时值三角函数式。

3.4 图 3.36 所示为某电路中电压和电流的波形图。试分别写出它的三角函数表达式、相量形式，做出相量图，并求出其相位差。

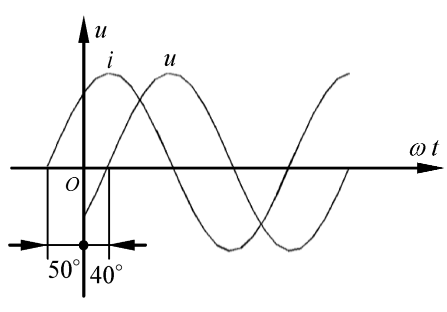


图 3.36 习题 3.4 图

3.5 有一个 220V、4.2kW 的电炉（纯电阻），接在 220V 的交流电源上，试求通过电炉的电流和正常工作时的电阻。

3.6 把一个线圈接在 48V 的直流电源上，电流为 8A；将它改接于 50Hz、120V 的交流电源上，电流为 12A，求线圈的电阻和电感。

3.7 当 30V 的直流电压加到某一线圈上时，消耗的功率为 150W；改用 230V 的交流电压加到同一线圈上时，消耗的功率为 3174W。求此线圈的感抗。

3.8 额定电压 220V、功率为 100W、功率因数为 0.5 的日光灯 20 盏，与额定电压 220V、功率为 40W 的白炽灯并连接在电压为 220V 的交流电源上，求总电流和总功率因数，并绘出总电流与总电压的相量图。

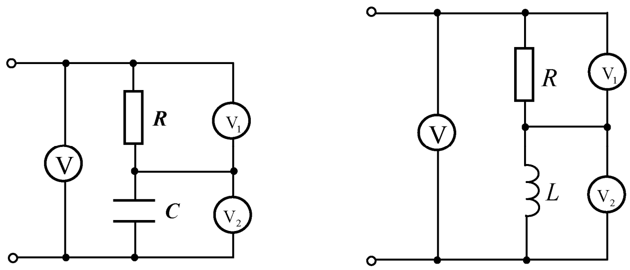
3.9　把电容 C=25μF 的电容器接到 $u=\sqrt{2}\sin(10t-\pi/3)$V 的电源上。试求：

（1）试求电容上流过的电流 i；

（2）做出电压和电流的相量图；

（3）求电路的有功功率和无功功率。

3.10　图 3.37 所示电路中电压表 V_1 和 V_2 的读数都是 5V，试求两图中电压表 V 的读数。



（a）　　（b）

图 3.37　习题 3.10 图

3.11　图 3.38 所示电路中，已知各并联支路中电流表的读数分别为 A_1 的读数是 5A，A_2 的读数是 20A，A_3 的读数是 25A，求电流表 A 的读数。

3.12　有一个RC串联电路如图3.39所示，已知：R=10kΩ，C=5100pF，电压 $u=\sqrt{2}\sin\omega t$ V，f=1kHz，试求电路的 Z，$\dot{I}$，$\dot{U}_R$，$\dot{U}_C$。

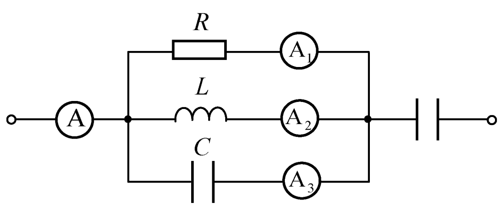


图 3.38　习题 3.11 图

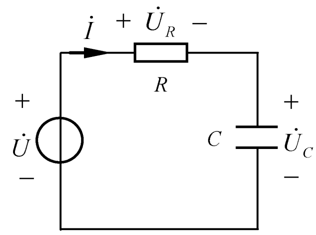


图 3.39　习题 3.12 图

3.13　在图 3.40 所示电路中，已知 $u=220\sqrt{2}\sin 314t$V，R=5.4Ω，L=12.7mH，试求电路的 $|Z|$，阻抗角 φ，电流 I，功率 P。

3.14　图 3.41 所示电路中，已知 $Z_1=(2+\mathrm{j}4)\Omega$，$Z_2=-\mathrm{j}5\Omega$，$Z_3=(4+\mathrm{j}5)\Omega$，$Z_3$ 上电压有效值 $U_3=220$V，求电流 $\dot{I}$ 和电压 $\dot{U}$。

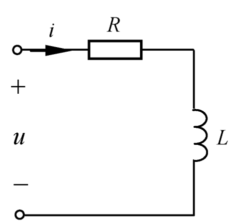


图 3.40　习题 3.13 图

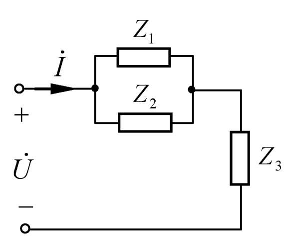


图 3.41　习题 3.14 图

3.15　已知正弦交流电路如图 3.42 所示，R=60Ω，ωL=80Ω，1/ωC=48Ω，I_R=1A。求 $\dot{U}$。

3.16　图 3.43 所示电路，$\dot{U}=220\angle 0°$ V，$Z_1=\mathrm{j}10\Omega$，$Z_2=\mathrm{j}50\Omega$，$Z_3=100\Omega$，求各电流。

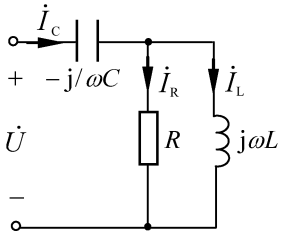


图 3.42　习题 3.15 图

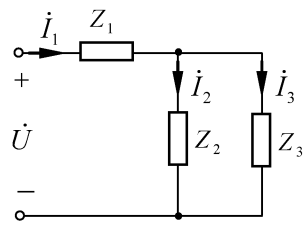


图 3.43　习题 3.16 图

3.17　图 3.44 所示电路是利用功率表、电流表、电压表测量交流电路参数的方法，现测出功率表读数为 940W，电压表读数为 220V，电流表读数为 5A，电源频率为 50Hz，试求线圈的 R 和 L 数值。

3.18　图 3.45 所示电路，电压 U 为 220V，由一只电炉和一台满载电动机并联，电炉为纯电阻，负载 R=30Ω，电动机为感性负载，它的额定功率 P=13.2kW，$\cos\varphi = 0.8$，求总电流。

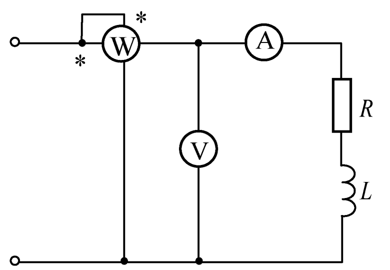


图 3.44　习题 3.17 图

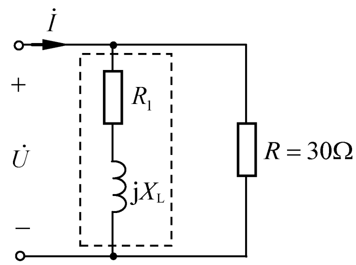


图 3.45　习题 3.18 图

3.19　图 3.46 所示电路中，已知 $\dot{I}_S = 4\angle 90°\text{A}$，$Z_1 = Z_2 = -j30\Omega$，$Z_3 = 30\Omega$，$Z_4 = 45\Omega$，求 Z_4 中的电流 $\dot{I}$。

3.20　图 3.47 电路，已知 I_1=10A、$I_2=10\sqrt{2}$ A、U=100V、R=5Ω、$R_2=X_C$，求：I、X_C、X_L。

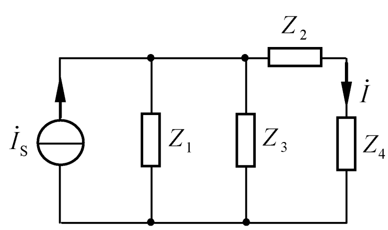


图 3.46　习题 3.19 图

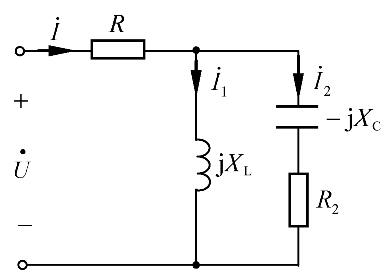


图 3.47　习题 3.20 图

3.21　电路相量模型如图 3.48 所示，求 $\dot{I}$、$\dot{I}_1$、$\dot{I}_2$，并画电流相量图。

3.22　如图 3.49 所示，若 R=5Ω，L=0.03H，电源频率 f=50Hz，现在要求开关 S 接通与断开时电流表的读数不变，问 C 应等于多大？

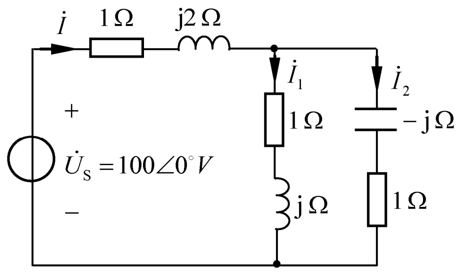


图 3.48　习题 3.21 图

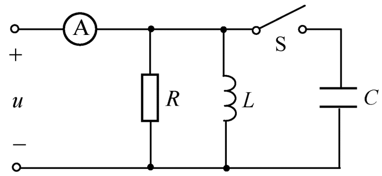


图 3.49　习题 3.22 图

3.23　在 RLC 串联电路中，已知电源电压 $u = 220\sqrt{2}\sin 314t\text{V}$，$R$=30Ω，$L$=445mH，$C$=32μF。试求：

（1）总复阻抗 Z；

（2）电路中的电流 $\dot{I}$；

（3）三个元件的电压相量 $\dot{U}_R$、$\dot{U}_L$、$\dot{U}_C$。

（4）电路 P、Q、S、$\cos\varphi$。

3.24　将一线圈（L=4mH，R=50Ω）与电容器（C=160pF）串联，接在 U=25V 的正弦交流电源上。

（1）求电路的谐振频率；

（2）求谐振时电路的电流和电容器两端电压；

（3）计算电路的品质因数。

3.25　图3.50所示电路中，当调节C，使电流与端电压同相时，测出U =100V，U_C=180V，I=1A，电源的频率f=50Hz，求电路中的R、L、C。

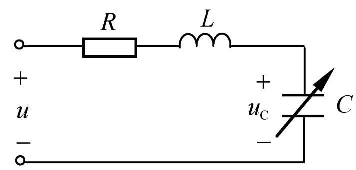


图 3.50　习题 3.25 图

3.26　某RL串联负载，两端施加正弦交流电压 $u = 220\sqrt{2}\sin 314t\text{V}$，测得有功功率$P$＝40W，电阻电压$U_R$＝110V。试求电路的功率因数？若将电路的功率因数提高到0.85，则应并联多大电容，并计算补偿前后输电线路中的电流。

第 4 章　三 相 电 路

电能的生产、传输和供电方式绝大多数都采用三相制。本章主要介绍三相交流电的产生及特点、三相电路电源和负载的连接方式、三相电路中相电压和线电压之间的关系、相电流和线电流之间的关系、对称和不对称三相电路的分析计算，以及三相电路的功率，最后对安全用电技术做简要介绍。

4.1　三相交流电源

4.1.1　三相对称电源

三相对称电源模型如图 4.1 所示。工程上一般将其正极性端分别记为 A、B、C，分别用黄色、绿色、红色三种颜色标记。负极性端分别记为 X、Y、Z。每一个电压源称为一相，三个电压源分别称为 A 相、B 相、C 相。三相对称电源产生三个幅值相等、频率相同、相位互差 120°的正弦交流电压，分别记为 u_A、u_B、u_C，如图 4.2 所示。

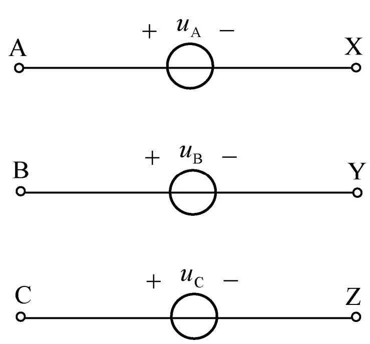


图 4.1　三相对称电源

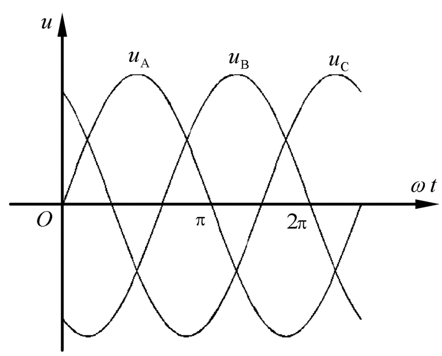


图 4.2　三相对称电源电压波形

如果以 A 相为参考正弦量，则三相电源中各相电压的瞬时值可分别表示为

$$\left.\begin{aligned} u_A(t) &= \sqrt{2}U_P \sin \omega t \\ u_B(t) &= \sqrt{2}U_P \sin(\omega t - 120^\circ) \\ u_C(t) &= \sqrt{2}U_P \sin(\omega t + 120^\circ) \end{aligned}\right\} \tag{4-1}$$

式中，U_P 为每相电源电压的有效值。这样的一组电压称为三相对称电压。写成相量形式为

$$\left.\begin{aligned} \dot{U}_A &= U_P\angle 0^\circ \\ \dot{U}_B &= U_P\angle -120^\circ \\ \dot{U}_C &= U_P\angle 120^\circ \end{aligned}\right\} \tag{4-2}$$

三相对称电压的相量图如图 4.3 所示。不难证明，对称三相电压的瞬时值或相量之和

等于零，即

$$u_A + u_B + u_C = 0 \qquad (4-3)$$

或

$$\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C = 0$$

在三相交流电源中，将三相电源依次出现最大值的先后顺序称为三相电源的相序。如果相序出现的顺序为 A、B、C，则称为正序；反之，则称为反序。由此可知，只要知道相序和任一相电压，就可以确定其他两相电压。

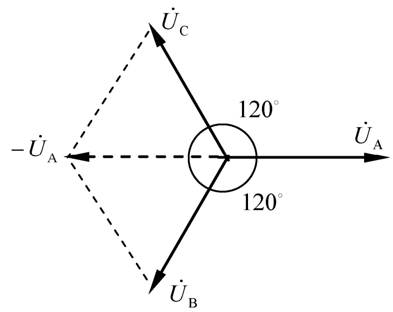


图 4.3　相量图

4.1.2　三相电源的连接

在三相交流电路中，三相电源的三个电压源之间有星形（Y形）和三角形（△形）两种连接方式。

1．星形（Y形）连接

在低压供电系统中，星形连接是最常见的连接方式，如图 4.4 所示，三个电源的负极性端 X、Y、Z 连接在一起形成公共的端点 N，称为中性点（或中点），对外形成 A、B、C 和 N 四个端子。从 A、B、C 三个端子引出的线称为相线（或端线），俗称火线；从 N 点引出的线称为中线（或零线）。端线中流过的电流称为线电流。没有中线的三相输电系统称为三相三线制，有中线的三相输电系统称为三相四线制，中线中流过的电流称为中线电流。

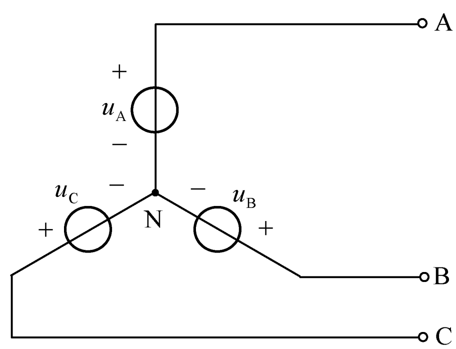


图 4.4　三相电源的星形（Y形）连接

相线与中线之间的电压称为相电压，有效值记为 U_P；任意两条端线之间的电压 $\dot{U}_{AB}$、$\dot{U}_{BC}$、$\dot{U}_{CA}$ 称为线电压，有效值记为 U_L。线电压与相电压之间的关系为

$$\left.\begin{aligned}\dot{U}_{AB} &= \dot{U}_A - \dot{U}_B \\ \dot{U}_{BC} &= \dot{U}_B - \dot{U}_C \\ \dot{U}_{CA} &= \dot{U}_C - \dot{U}_A\end{aligned}\right\} \qquad (4-4)$$

其相量图如图 4.5 所示。

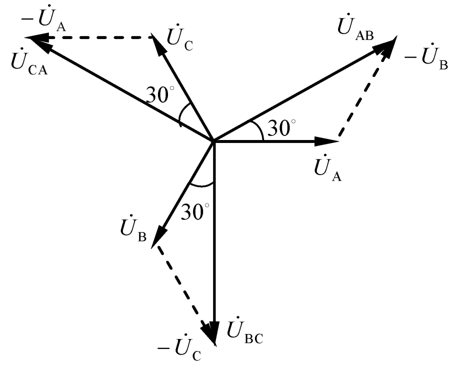


图 4.5　相、线电压相量图

将式（4-2）代入式（4-4）得

$$\left.\begin{aligned}\dot{U}_{AB}&=\sqrt{3}U_P\angle 30^\circ=\sqrt{3}\dot{U}_A\angle 30^\circ\\ \dot{U}_{BC}&=\sqrt{3}U_P\angle -90^\circ=\sqrt{3}\dot{U}_B\angle 30^\circ\\ \dot{U}_{CA}&=\sqrt{3}U_P\angle 150^\circ=\sqrt{3}\dot{U}_C\angle 30^\circ\end{aligned}\right\}\tag{4-5}$$

由此可见，对于三相对称星形电源，线电压也是对称的，线电压的有效值是相电压有效值的 $\sqrt{3}$ 倍，即 $U_L=\sqrt{3}U_P$；线电压的相位超前相应相电压 30°。常见的三相四线制低压供电系统可以向负载提供线电压 380V 和相电压 220V 两种电压。一般家用电器及电子仪器用 220V，动力系统及三相负载用 380V。三相三线制供电系统只能向负载提供线电压，在大功率长距离输电时普遍采用。

2．三角形（△形）连接

如果将三相电源的每相的负极性端与另一相的正极性端依次相连成三角形，并由三角形的三个顶点引出三条端线给用户供电，就构成了三角形（△形）连接方式，如图 4.6 所示。

在三角形（△形）连接方式中，线电压等于相电压，即

$$\left.\begin{aligned}\dot{U}_{AB}&=\dot{U}_A\\ \dot{U}_{BC}&=\dot{U}_B\\ \dot{U}_{CA}&=\dot{U}_C\end{aligned}\right\}\tag{4-6}$$

由此可知，三相电源作三角形连接时，线电压等于相电压，即 $U_L=U_P$，且相位相同。其相量图如图 4.7 所示。

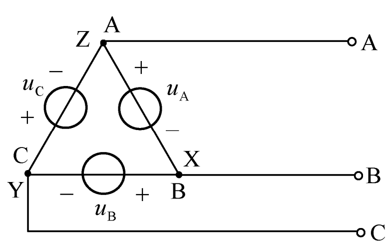


图 4.6　三相电源的三角形（△形）连接

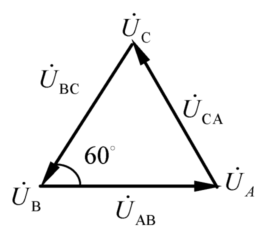


图 4.7　相量图

当三个电源正确连接时，回路总电压 $\dot{U}=\dot{U}_{\rm A}+\dot{U}_{\rm B}+\dot{U}_{\rm C}=0$，所以电源内部无环流。但是如果有某相电源的极性接反了，三个相电压的和不再为零，电源回路中将产生很大的环流，导致烧坏电源等事故发生，所以三相电源一般不接成三角形。

4.2　三相负载的连接

三相负载也有星形（Y形）连接和三角形（△形）连接两种方式，如图 4.8 所示。

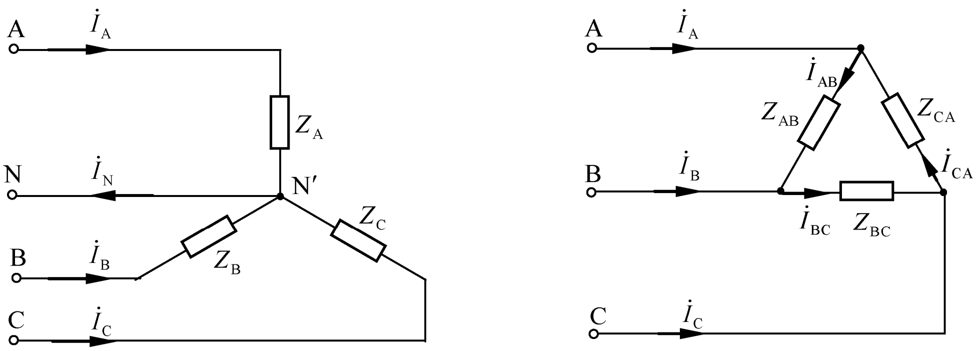


图 4.8　三相负载的连接方式

4.2.1　星形（Y 形）的连接

将三相负载的任意一端接成一点（称为中性点），另一端分别接三相电源的端线，则构成三相负载的星形连接。三相负载分别为 $Z_{\rm A}$、$Z_{\rm B}$、$Z_{\rm C}$，当 $Z_{\rm A}=Z_{\rm B}=Z_{\rm C}$ 时，称为对称负载。

流过端线的电流称为线电流，而流过每相负载的电流称为相电流。负载星形连接一般接成三相四线制。在星形连接的三相对称电路中，三相电流也对称，中线电流为零，中线可以省略，采用三相三线制。

对于三相四线制星形连接的负载，无论负载对称与否，都具有如下特点：

① 线电压与相电压的关系。

负载的相电压即为电源的相电压；满足 $\dot{U}_{\rm L}=\sqrt{3}\dot{U}_{\rm P}\angle 30^\circ$。

② 线电流与相电流的关系。

负载相电流即为端线中的线电流，即 $\dot{I}_{\rm L}=\dot{I}_{\rm P}$。

而对于三相三线制星形负载，其特点为：

① 无论负载对称与否，负载相电流等于线电流，即 $\dot{I}_{\rm L}=\dot{I}_{\rm P}$。当三相电源为对称电源时，电流是否对称取决于负载是否对称，负载对称则电流必对称。

② 负载对称时，$\dot{U}_{\rm L}=\sqrt{3}\dot{U}_{\rm P}\angle 30^\circ$；负载不对称时，相电压也不对称，负载不能正常工作。

需要注意的是，中线的作用是在负载不对称的情况下，保证负载具有对称电压，因此在三相四线制电路中，中线是不能断开的，也不能接入熔断器等短路和过流保护装置。

当三相负载的额定电压等于三相电源线电压的 $1/\sqrt{3}$ 时，三相负载应选择星形连接方式。

4.2.2　三角形（△形）的连接

当三相负载的额定电压等于三相电源线电压时，三相负载应选择三角形连接方式，三相负载分别记为 Z_{AB}、Z_{BC}、Z_{CA} 。三角形连接的负载具有以下特点：

①相电压与线电压的关系。

无论负载对称与否，每相负载的相电压即为电源的线电压，即 $\dot{U}_P = \dot{U}_L$ 。

②相电流与线电流的关系。

如图 4.8（b）所示，负载相电流 $\dot{I}_{AB}$、$\dot{I}_{BC}$、$\dot{I}_{CA}$ 与线电流 $\dot{I}_A$、$\dot{I}_B$、$\dot{I}_C$ 之间的关系为

$$\left.\begin{aligned}\dot{I}_A &= \dot{I}_{AB} - \dot{I}_{CA}\\ \dot{I}_B &= \dot{I}_{BC} - \dot{I}_{AB}\\ \dot{I}_C &= \dot{I}_{CA} - \dot{I}_{BC}\end{aligned}\right\} \tag{4-7}$$

而每相负载的相电流分别为

$$\left.\begin{aligned}\dot{I}_{AB} &= \frac{\dot{U}_{AB}}{Z_{AB}} = \frac{\sqrt{3}\dot{U}_A\angle 30^\circ}{Z_{AB}}\\ \dot{I}_{BC} &= \frac{\dot{U}_{BC}}{Z_{BC}} = \frac{\sqrt{3}\dot{U}_B\angle 30^\circ}{Z_{BC}}\\ \dot{I}_{CA} &= \frac{\dot{U}_{CA}}{Z_{CA}} = \frac{\sqrt{3}\dot{U}_C\angle 30^\circ}{Z_{CA}}\end{aligned}\right\} \tag{4-8}$$

电源和负载对称的情况下，相电流和线电流也是对称的。相电流和线电流的相量图如图 4.9 所示。从相量图上可以看出，线电流的有效值是相电流有效值的 $\sqrt{3}$ 倍，即 $I_L = \sqrt{3}I_P$；线电流的相位滞后相应相电流 30°，即 $\dot{I}_A$ 滞后 $\dot{I}_{AB}$ 30°，$\dot{I}_B$ 滞后 $\dot{I}_{BC}$ 30°，$\dot{I}_C$ 滞后 $\dot{I}_{CA}$ 30°。写成一般式为

$$\dot{I}_L = \sqrt{3}\dot{I}_P\angle -30^\circ$$

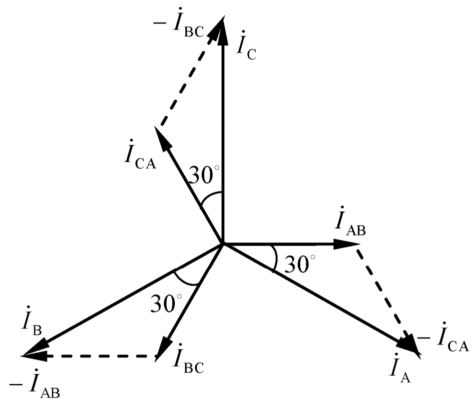


图 4.9　电流相量图

负载不对称时，即使三个相电压对称，相电流和线电流也不对称。

4.3 三相电路的计算

4.3.1 三相对称电路的计算

由三相对称电源和三相对称负载用输电线连接起来所组成的三相电路称为对称三相电路。三相电路实质上是复杂交流电路的一种特殊类型，因此，交流电路的分析方法对三相电路完全适用。对称三相电路，由于其电压和电流是对称的，所以只需计算一相的电压和电流，其他两相的电压和电流可以类推。

1．对称三相四线制电路（Y-Y_O 接法）

星形连接对称三相电源与星形连接对称三相负载，通过四根导线连接构成的电路，称为对称三相四线制电路，如图 4.10 所示。其中 Z_N 为中线阻抗，$Z=|Z|\angle\varphi$ 为负载阻抗。由图可知，无论是负载还是电源，它们的相电流恒等于线电流，线电压等于两个相电压的差。

设 N、N′之间的电压为 $\dot{U}_{N'N}$，方向由 N′指向 N，故节点 N′的 KCL 方程为

$$\frac{\dot{U}_A-\dot{U}_{N'N}}{Z}+\frac{\dot{U}_B-\dot{U}_{N'N}}{Z}+\frac{\dot{U}_C-\dot{U}_{N'N}}{Z}=\frac{\dot{U}_{N'N}}{Z_N} \tag{4-9}$$

即

$$\left(\frac{1}{Z_N}+\frac{3}{Z}\right)\dot{U}_{N'N}=\frac{1}{Z}\left(\dot{U}_A+\dot{U}_B+\dot{U}_C\right) \tag{4-10}$$

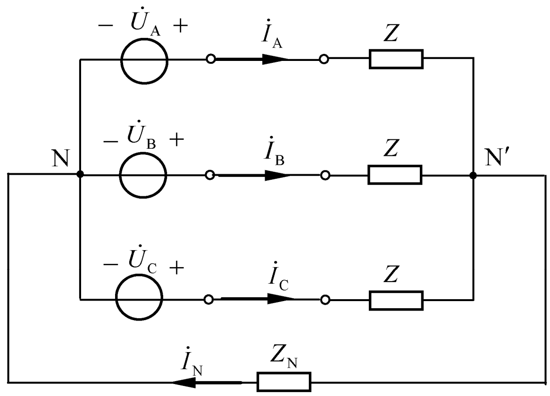


图 4.10 对称三相四线制电路

由于 $\dot{U}_A+\dot{U}_B+\dot{U}_C=0$，所以 $\dot{U}_{N'N}=0$。即 N′点与 N 点电位相同，则不论中线上有无阻抗，N′与 N 都可以用一条导线短接。则有

$$\left.\begin{aligned}\dot{I}_A &= \frac{\dot{U}_A}{Z} = \frac{U_P}{|Z|}\angle -\varphi \\ \dot{I}_B &= \frac{\dot{U}_B}{Z} = \frac{U_P}{|Z|}\angle -\varphi - 120^\circ = \dot{I}_A\angle -120^\circ \\ \dot{I}_C &= \frac{\dot{U}_C}{Z} = \frac{U_P}{|Z|}\angle -\varphi + 120^\circ = \dot{I}_A\angle +120^\circ\end{aligned}\right\} \tag{4-11}$$

中线电流为

$$\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0$$

因此，对称三相四线制电路各相之间相互独立，可以用化归单相的方法计算，即分离出一相作为参考相，只计算这一相的电流和电压，而其他两相的电流和电压可以按相应相位关系直接推断得到。图 4.11 为一相计算电路（A 相）。注意，在一相计算电路中，连接 N、N´ 的是短路线，与中线阻抗 Z_N 无关。

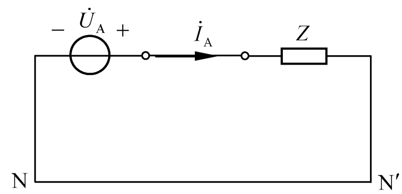


图 4.11　一相计算电路

例 4.1 对称三相电路如图 4.10 所示，已知 $u_{AB} = 380\sqrt{2}\sin(\omega t + 30^\circ)\text{V}$，$Z = (6 + \text{j}8)\Omega$，试求负载中各电流相量。

解：根据星形连接电路线电压与相电压，有

$$\dot{U}_A = \frac{\dot{U}_{AB}}{\sqrt{3}}\angle -30^\circ = 220\angle 0^\circ\ \text{V}$$

可分离出如图 4.11 所示一相（A 相）计算电路，求得

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_A}{Z} = \frac{220\angle 0^\circ}{6 + j8} = 22\angle -53.1^\circ\text{A}$$

根据对称性可以写出

$$\dot{I}_B = \dot{I}_A\angle -120^\circ = 22\angle -173.1^\circ\ \text{A}$$

$$\dot{I}_C = \dot{I}_A\angle +120^\circ = 22\angle 66.9^\circ\text{A}$$

2．负载三角形连接方式的对称三相电路

无论电源的连接方式如何，三角形连接的各相负载都直接接在电源的线电压上，所以负载的相电压与电源的线电压相等。

如图 4.8（b）所示，负载阻抗 $Z_{AB} = Z_{BC} = Z_{CA} = Z = |Z|\angle\varphi$。图中 $\dot{I}_A$、$\dot{I}_B$、$\dot{I}_C$ 为线电流，$\dot{I}_{AB}$、$\dot{I}_{BC}$、$\dot{I}_{CA}$ 为相电流。

以电源线电压 $\dot{U}_{AB}$ 为参考相量，可求得相电流为

$$\left.\begin{aligned}\dot{I}_{AB}&=\frac{\dot{U}_{AB}}{Z}=\frac{U_L}{|Z|}\angle-\varphi\\ \dot{I}_{BC}&=\frac{\dot{U}_{BC}}{Z}=\frac{U_L}{|Z|}\angle-\varphi-120^\circ=\dot{I}_{AB}\angle-120^\circ\\ \dot{I}_{CA}&=\frac{\dot{U}_{CA}}{Z}=\frac{U_L}{|Z|}\angle-\varphi+120^\circ=\dot{I}_{AB}\angle+120^\circ\end{aligned}\right\}\tag{4-12}$$

对于三角形连接方式的对称三相电路，由于各相负载所承受的电压也是对称的，所以也可以用归结为一相的计算方法。但应注意，三角形连接的各相负载电压是电源的线电压。

例 4.2 三相对称电源的线电压 $U_L=380V$，三角形连接的对称三相负载，每相阻抗为 $Z=(16+j12)\Omega$，试求各相负载的相电流 I_P 和线电流 I_L。

解：负载三角形连接时，各相负载的相电压等于电源的线电压，即

$U_P=U_L=380V$

每相阻抗为

$Z=(16+j12)=20\angle 36.9^\circ\ \Omega$

各相负载的相电流为

$I_P=\dfrac{U_P}{|Z|}=\dfrac{380}{20}=19A$

线电流为

$I_L=\sqrt{3}I_P=32.9A$

4.3.2　不对称三相电路的计算

实际三相电路中，正常情况下，三相电源是对称的，而三相负载不对称的情况却比较常见。不对称三相电路是指三相负载本身不对称，或者原来对称的三相电路的某一端线断开，或某一相负载发生短路或开路等情况下的电路。在不对称三相电路中，由于三相电流、三相负载电压不对称，不能采用前面所述化归单相的方法进行分析计算，而需采用其他分析方法进行分析计算。如图 4.12（a）所示的三相电路，三相电源是对称的，但负载不对称。

当开关 S 打开（即不接中线）时，可求得电压 $\dot{U}_{N'N}$ 为

$$\dot{U}_{N'N}=\frac{\dfrac{\dot{U}_A}{Z_A}+\dfrac{\dot{U}_B}{Z_B}+\dfrac{\dot{U}_C}{Z_C}}{\dfrac{1}{Z_A}+\dfrac{1}{Z_B}+\dfrac{1}{Z_C}}\tag{4-13}$$

由于负载不对称，一般情况下，$\dot{U}_{N'N}\neq 0$，即 N′点和 N 点电位不同。从图 4.12（b）的相量关系可以清楚看出，N′点和 N 点不重合，这一现象称为中性点位移。如果 $\dot{U}_{N'N}$ 的值较大，会使有的相电压低于额定电压，负载不能正常工作；而有的相电压高于额定电压，导致负载损坏。在图 4.12（b）中，A 相电压降低了（AN′<AN），而 B 相的电压升高了（BN′>BN）。另一方面，由于 $\dot{U}_{N'N}\neq 0$，各相之间失去了独立性，某一相负载变动时，其他相会受到影响。

当合上开关 S（接上中线）时，如果 $Z_N \approx 0$，则可强制使 $\dot{U}_{N'N}=0$。尽管负载是不对称的，但由于中线的作用，使得不对称负载的相电压对称，各相的工作互不影响，因而各相可以分别独立计算。这就克服了无中线时引起的缺点。因此，在负载不对称的情况下中线的存在是非常重要的。

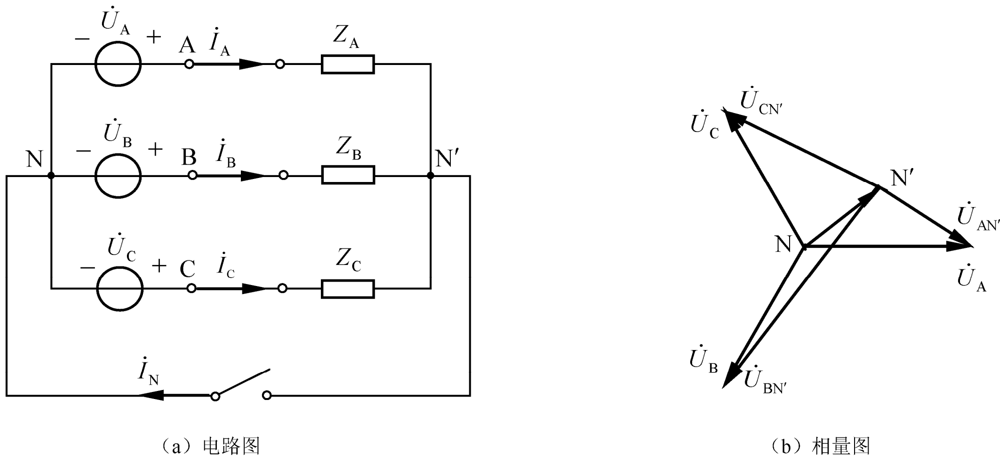


图 4.12　不对称三相四线制电路

由于相电流不对称，中线电流一般不为零，即 $\dot{I}_N=\dot{I}_A+\dot{I}_B+\dot{I}_C\neq 0$。

例 4.3 如图 4.12（a）所示电路中，三相电源的线电压 U_L=380V，每相负载分别为 $Z_A=11\Omega$，$Z_B=Z_C=22\Omega$，试求开关 S 闭合前后，各相负载的相电流、中线电流和中性点位移 $U_{N'N}$。

解：以 $\dot{U}_A$ 为参考相量，则

$$\dot{U}_A=\frac{U_L}{\sqrt{3}}\angle 0^\circ=220\angle 0^\circ\ \text{V}$$

（1）开关 S 闭合前。

因为没有中线，则负载相电压不等于电源相电压，即

$$\dot{U}_{N'N}=\frac{\dfrac{\dot{U}_A}{Z_A}+\dfrac{\dot{U}_B}{Z_B}+\dfrac{\dot{U}_C}{Z_C}}{\dfrac{1}{Z_A}+\dfrac{1}{Z_B}+\dfrac{1}{Z_C}}=\frac{\dfrac{220\angle 0^\circ}{11}+\dfrac{220\angle -120^\circ}{22}+\dfrac{220\angle 120^\circ}{22}}{\dfrac{1}{11}+\dfrac{1}{22}+\dfrac{1}{22}}$$

$$=55\angle 0^\circ\ \text{V}$$

即

$$U_{N'N}=55\text{V}$$

$$\dot{U}_{AN'}=\dot{U}_A-\dot{U}_{N'N}=165\angle 0^\circ\ \text{V}$$

$$\dot{U}_{BN'}=\dot{U}_B-\dot{U}_{N'N}=252\angle -131^\circ\ \text{V}$$

$$\dot{U}_{CN'}=\dot{U}_C-\dot{U}_{N'N}=252\angle 131^\circ\ \text{V}$$

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_{AN'}}{Z_A} = 15\angle 0^\circ \text{ A}, \quad I_A = 15\text{A}$$

$$\dot{I}_B = \frac{\dot{U}_{BN'}}{Z_B} = \frac{252\angle -131^\circ}{22} = 11.45\angle -131^\circ \text{ A}, \quad I_B = 11.45\text{A}$$

$$\dot{I}_C = \frac{\dot{U}_{CN'}}{Z_C} = \frac{252\angle 131^\circ}{22} = 11.45\angle 131^\circ \text{ A}, \quad I_C = 11.45\text{A}$$

因中线断开，故

$I_N = 0\text{A}$

(2) 开关S闭合后。

因为有中线，则负载相电压即电源相电压，则

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_A}{Z_A} = 20\angle 0^\circ \text{ A}$$

$I_A = 20\text{A}$

$$\dot{I}_B = \frac{\dot{U}_B}{Z_B} = \frac{220\angle -120^\circ}{22} = 10\angle -120^\circ \text{ A}$$

$I_B = 10\text{A}$

$$\dot{I}_C = \frac{\dot{U}_C}{Z_C} = \frac{220\angle 120^\circ}{22} = 10\angle 120^\circ \text{ A}$$

$I_C = 10\text{A}$

$\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 10\angle 0^\circ \text{ A}$

$I_N = 10\text{A}$

$U_{N'N} = 0$

4.4　三相电路的功率

4.4.1　瞬时功率

在三相电路中，三相负载的瞬时功率为各相负载瞬时功率之和，即

$$p = p_A + p_B + p_C = u_A i_A + u_B i_B + u_C i_C \text{（星形连接）} \tag{4-14}$$

$$p = p_{AB} + p_{BC} + p_{CA} = u_{AB} i_{AB} + u_{BC} i_{BC} + u_{CA} i_{CA} \text{（三角形连接）} \tag{4-15}$$

当负载对称时，以图4.10所示对称三相电路为例，有

$$\begin{aligned} p_A &= u_A i_A = \sqrt{2} U_P \sin\omega t \times \sqrt{2} I_P \sin(\omega t - \varphi) \\ &= U_P I_P \left[\cos\varphi - \cos(2\omega t - \varphi)\right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} p_B &= u_B i_B = \sqrt{2} U_P \sin\left(\omega t - 120^\circ\right) \times \sqrt{2} I_P \sin(\omega t - 120^\circ - \varphi) \\ &= U_P I_P \left[\cos\varphi - \cos(2\omega t + 120^\circ - \varphi)\right] \end{aligned}$$

$$p_C = u_C i_C = \sqrt{2}U_P \sin(\omega t + 120^\circ) \times \sqrt{2} I_P \sin(\omega t + 120^\circ - \varphi)$$
$$= U_P I_P \left[\cos\varphi - \cos(2\omega t - 120^\circ - \varphi)\right]$$

它们的和为

$$p = p_A + p_B + p_C = 3U_P I_P \cos\varphi \quad （4-16）$$

即对称三相电路的瞬时功率是一个常量，其值等于有功功率。这是对称三相电路的一个优越性能，习惯上把这一性能称为瞬时功率平衡。

4.4.2　有功功率

三相负载从电源吸收的有功功率等于各相负载吸收的有功功率之和，即

$$P = P_{PA} + P_{PB} + P_{PC} = U_{PA} I_{PA} \cos\varphi_{PA} + U_{PB} I_{PB} \cos\varphi_{PB} + U_{PC} I_{PC} \cos\varphi_{PC}$$

式中的电压和电流是各相电压和相电流的有效值，φ_{PA}、φ_{PB} 和 φ_{PC} 是各相电压与该相电流之间的相位差。

当负载对称时，各相有功功率相等，设每相有功功率为 P_P，则三相总功率为

$$P = 3P_P = 3U_P I_P \cos\varphi \quad （4-17）$$

式中 φ 角是每相负载的阻抗角，即相电压与相电流的相位差。

当三相对称负载作星形连接时

$$U_L = \sqrt{3}U_P，I_L = I_P \quad （4-18）$$

当三相对称负载作三角形连接时

$$U_L = U_P，I_L = \sqrt{3}I_P \quad （4-19）$$

将式（4-18）或式（4-19）关系代入式（4-17），则得

$$P = \sqrt{3}U_L I_L \cos\varphi \quad （4-20）$$

不论三相负载是星形连接还是三角形连接，上式均成立。必须注意，φ 是相电压与相电流的相位差，而不是线电压与线电流之间的相位差。φ 角取决于每相负载的阻抗角，而与负载的连接方式无关。

在三相三线制电路中，不论对称与否，可以使用两个功率表测量三相功率。两个功率表的一种连接方式如图 4.13 所示。两个功率表的电流线圈分别串入两条相线中（图示为 A、B 两条相线），它们的电压线圈的非电源端（即无“*”端）共同接到非电流线圈所在的第 3 条相线上（图示为 C 相线）。可以看出，这种测量方法中功率表的接线只触及相线，而与负载和电源的连接方式无关。这种方法习惯上称为二瓦计法。两个功率表读数的代数和为三相负载吸收的总有功功率。

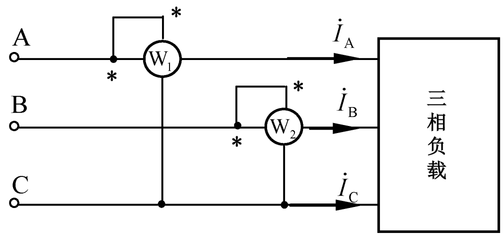


图 4.13　二瓦计法

4.4.3　无功功率

三相负载的总无功功率 Q 也等于各相无功功率之和。如果是对称三相负载，则不论是星形连接还是三角形连接，都有

$$Q = 3U_P I_P \sin\varphi = \sqrt{3} U_L I_L \sin\varphi \tag{4-21}$$

4.4.4　视在功率

三相负载的视在功率按功率三角形关系计算，即

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \tag{4-22}$$

在对称的三相负载中，总视在功率等于

$$S = 3U_P I_P = \sqrt{3} U_L I_L \tag{4-23}$$

例 4.4 有一台三相电动机，每相负载的等效电阻 R =29Ω，等效感抗 X_L =21.8Ω，试求在下列两种情况下电动机的相电流、线电流以及从电源输入的功率，并比较所得结果。(1) 绕组联成星形接于 U_L=380V 的三相电源上；(2) 绕组联成三角形接于 U_L=220V 的三相电源上。

解：(1) $I_P = \dfrac{U_P}{|Z|} = \dfrac{220}{\sqrt{29^2 + 21.8^2}} = 6.1\text{A}$

$I_L = 6.1\text{A}$

$$P = \sqrt{3} U_L I_L \cos\varphi = \sqrt{3} \times 380 \times 6.1 \times \frac{29}{\sqrt{29^2 + 21.8^2}} = 3.2\text{kW}$$

(2) $I_P = \dfrac{U_P}{|Z|} = \dfrac{220}{\sqrt{29^2 + 21.8^2}} = 6.1\text{A}$

$I_L = \sqrt{3} I_P = \sqrt{3} \times 6.1 = 10.5\text{A}$

$$P = \sqrt{3} U_L I_L \cos\varphi = \sqrt{3} \times 220 \times 10.5 \times \frac{29}{\sqrt{29^2 + 21.8^2}} = 3.2\text{kW}$$

比较 (1)、(2) 的结果：有的三相电动机标示两种额定电压，譬如 220/380V。这表示当电源电压（指线电压）为 220V 时，电动机的绕组应联成三角形；当电源电压为 380V 时，电动机应联成星形。在两种连接方式中，相电压、相电流及功率都未改变，而线电流在 (2) 的情况下增大为在 (1) 的情况下的 $\sqrt{3}$ 倍。

4.5 安 全 用 电

电气设备遍布人们日常生产和生活各角落，给人类生活带来极大方便。但使用不当会造成人身触电伤亡事故或电气设备损坏，甚至会引起火灾和爆炸，给社会造成极大损失。为了使用者的人身安全和电气设备的正常运行，必须注意安全用电。

4.5.1 触电方式

触电情况各种各样，一般有如下 4 种触电方式。

1. 直接接触带电体

（1）中性点接地系统的单相触电。

目前低压供电线路（380/220V）广泛采用的是中性点直接接地的三相四线制供电系统。由于中性点的电位与大地相同，当人站在地面上，若一只手触摸到供电线路的任一根相线（若该线路由于长年风吹雨淋日晒，其外表绝缘层已老化脱落），则人体所受的是该相线与大地之间的电压，即相电压（220V），如图 4.14 所示。此时，通过人体的电流可由下式决定：

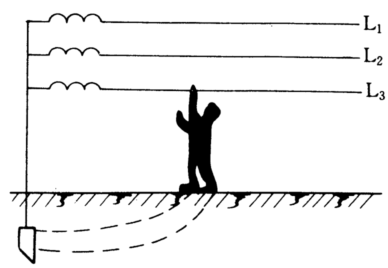


图 4.14 中性点接地系统的单相触电

$$I = \frac{U_P}{R_0 + R_m + R_\Sigma} \tag{4-24}$$

式中，U_P 为相电压，我国三线四线制供电系统中，U_P = 220V；R_0 为接地电阻，低压供电系统一般为 $R_0 \leqslant 4\Omega$；R_m 为人体电阻，与皮肤的干燥程度等因素有关，在不利情况下，一般为 1000Ω左右；R_Σ 为人体触电回路中，减去 R_m 的电阻总和（包括人与带电体的接触电阻、鞋底电阻及鞋底与地面的接触电阻等），若在最不利的情况下（如人赤脚站在潮湿的地面上），则 $R_\Sigma \approx 0$，此时通过人体的电流可达到 200mA 以上，显然，这是极其危险的。因此，为防止触电，有关规程中，在带电作业时，必须做好一些必要的防护措施，如必须穿戴好绝缘鞋、工作服、安全帽以及手套等。

（2）中性点不接地系统的单相触电。

如图 4.15 所示，在 10kV、35kV 高压电网中，为中性点不接地系统。当人站在地面上，触及其中某一相相线时，由于线路与大地之间存在分布电容，故电流流经人体和另外两相的对地电容形成回路，该电流足可以危及人身安全。

（3）两相触电。

当人体触及两相带电体时，如图 4.16 所示，人体所承受的将是线电压，故两相触电比单相触电更危险。

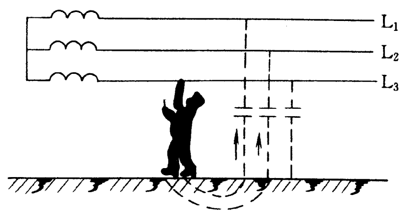


图 4.15　中性点不接地系统的单相触电

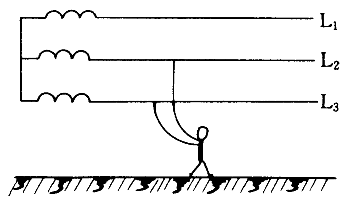


图 4.16　双相触电

（4）接触电气设备的金属外壳。

电气设备的金属外壳，在正常情况下是不带电的。但有时因内部绝缘材料受损，而使带电部分与金属外壳接触，从而使外壳带电，当人体触及时，就会造成触电事故。

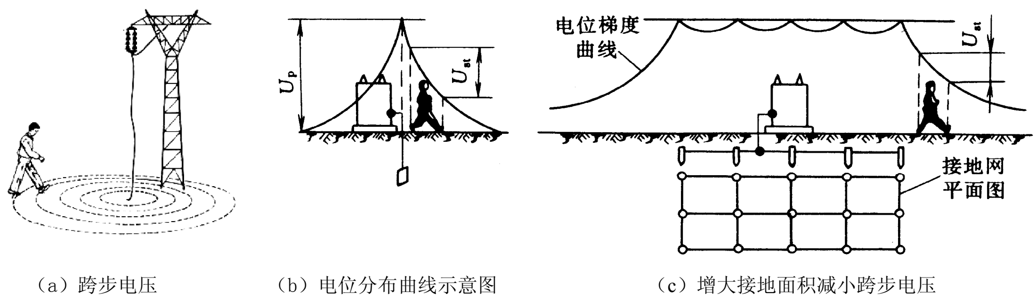
2．高压电弧触电

当人体与带电体的空气间隙小于最小安全距离时，虽然没有和带电体接触，但由于空气间隙的绝缘强度有限，当绝缘强度小于电场强度时，空气间隙将被击穿，则在人体与带电体之间产生高温电弧，于是人体将被灼伤，这是人体触电的另一种形式。

3．跨步电压触电

这类事故多发生在高压故障接地处。如有时大风雷雨天气，某一根高压带电线路断落在潮湿地面上。当带电设备发生某相接地时，接地电流流入大地，在距接地点不同的地表面各点上呈现不同电位，电位的高低与离开接地点距离有关，距离愈远电位愈低。当人的脚与脚之间同时踩在带有不同电位的地表面两点时，会引起跨步电压触电，如图 4.17（a）所示。

人体距接地体越近，跨步电压越大；与接地体的距离超过 20m 时，跨步电压近于零，如图 4.17（b）所示。为保证人身安全，跨步电压越小越好。为此，接地体常采用金属网状结构，以增大接地面积，减小电流密度，跨步电压也相应减小，如图 4.17（c）所示。发现邻近有高压线触地时，不要大步奔跑，而要单足或并足跳离线路触地点。



（a）跨步电压　（b）电位分布曲线示意图　（c）增大接地面积减小跨步电压

图 4.17　跨步电压及抑制

4．雷击触电

在雷雨天气，特别是荒郊野外，如有人在大树下避雨人体遭遇到落雷而致伤亡，这是大气过电压造成的人体触电事故。

4.5.2　触电防护

1．安全电压

选用安全电压是防止触电事故的重要措施。我国规定的安全电压如下：

①在危险性较低的建筑物中（如木板、瓷地板）为 36V；

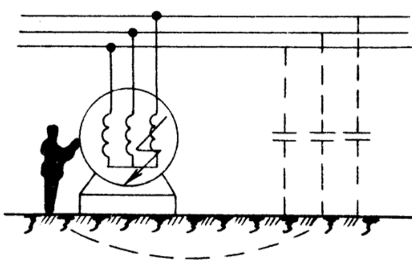
②在危险的建筑物中（如泥土、钢筋混凝土）为 24V；

③在特别危险的建筑物中（如铸工、化工车间）为 12V。

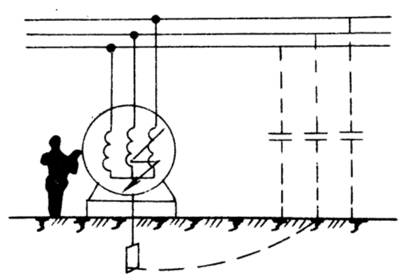
2．接地保护

接地保护，就是将电气设备的金属外壳或构架与大地可靠连接，以防止因漏电而可能发生的触电。接地保护适用于中性点不接地的三相供电系统。

在中性点不接地三相系统中，当某一设备如电动机因内部绝缘损坏而使机壳带电时，如果人体触及机壳，则将有电流通过人体与电力网的分布电容构成回路，如图 4.18（a）所示，造成人体触电。如果电动机的外壳通过接地装置与大地有良好的接触，则当人体触及电动机外壳时，人体相当于接地装置的一条并联支路，而人体电阻比接地电阻大得多，由并联分流公式可知，通过人体的电流就很小了，从而避免了触电危险，如图 4.18（b）所示。



（a）电气设备外壳不接地



（b）电气设备外壳接地

图 4.18　接地保护

3．接零保护

在 1000V 以下的中性点接地的三相四线制系统中，为了防止触电事故，把电气设备的外壳或构架与系统的零线（中性线）相连，即接零保护。接零保护必须与其他安全措施（如采用熔断器、断路器等）配合才能起保护作用。

采取了接零保护措施后，当电气设备由于某种原因造成一相碰壳时，将形成单相短路，由于中性线的阻抗很小，所以产生很大的短路电流，此电流远远超过保护电器的动作电流值，使保护电器动作，切断故障线路电源，防止人身触电事故，如图 4.19 所示。

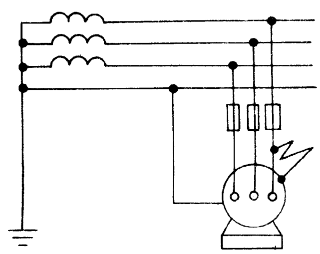


图 4.19　接零保护

4．防雷措施

装设避雷设施是防止雷击触电和保护电气设备的有效措施。避雷线和避雷针的作用是

从被保护物体上方引导雷电通过，并安全泄入大地，防止雷电直击，减小在其保护范围内的电气设备（架空输电线路及通电设备）和建筑物遭受直击雷的概率。避雷器的作用是通过并联放电间隙或非线性电阻，对入侵流动电波进行削幅，降低被保护的设备所承受的过电压值。避雷器既可用来防护大气过电压，也可用来防护操作过电压。

人身户外防雷要注意远离建筑物的避雷针及其接地引下线；远离各种天线、电线杆、高塔、烟囱、旗杆、树木等。

4.5.3　静电防护和电气防火防爆

1．静电防护

静电是一种客观的自然现象，产生的方式多种，如接触、摩擦等。静电一方面给人们生活带来方便，如静电复印、静电除尘等；另一方面，静电也在多个领域造成严重危害。摩擦起电和人体静电是电子工业中的两大危害。

静电防护就是消除静电或把静电压控制在允许的范围，使它不致产生危害。静电防护的常用措施有如下两种。

（1）静电保护接地。

接地就是直接将静电通过一条导线的连接泄放到大地，这是防静电措施中最直接最有效的方法，如人工带防静电手腕带及工作台面接地等。防静电地线不得接在电源零线上，不得与防雷地线共用。

（2）静电屏蔽。

具有空腔的金属导体在静电平衡状态下，不仅导体内部场强为零，而且腔内场强也为零，因而置于腔内的物体不受外界电场的影响，这种作用叫静电屏蔽。静电屏蔽的应用很广泛，例如电子仪器外的金属网罩。防静电衣对人体具有一定的屏蔽作用。

2．电气防火和防爆

电气设备如使用不当，有时会成为火灾的祸端。电气设备正常运行时，会产生弧光和火花。例如，直流电动机运转时，换向器会不断产生火花；电焊作业时，会产生温度很高的弧光等。电器运行火花和弧光如遇到可燃物质，就会引起火灾。电气设备运行发热也易点燃易燃物品而会引起火灾，严重时，可引起爆炸。

电气防火防爆措施应综合考虑，采取全面措施。首先要选用合理的电气设备；然后对电气设备的安装要严格按安全规程操作，要保持必要的防火间距；设备投入运行后，要保持其正常运行；要保持良好的通风，采用耐火设施，装设良好的保护装置等。

4.6　应 用 举 例

例4.5　如图4.20所示为实用三相四线制接线示意图，其相电压为220V，线电压为380V。负载如何连接要根据它的额定电压来确定。通常电灯及家用电器等单相负载的额定电压为220V，因此均应接在火线与中线之间。由于这些负载是大量使用的，不能每一幢大楼的家庭用电或工厂各车间的单相负载都接入同一相中，而应较均匀分接在三相线路上，如图所示。有些单相负载（如某些电炉、继电器等）的额定电压设计成380V的，则应接入两火线之间。有些负载的额定电压不等于220V或380V，则需通过变压器再接在火线与中线之

间或两火线之间。

某三层楼采用三相四线制供电，供电电压为 220V。由于某种原因中线断开，试分析：

（1）三层楼在负载相同的情况下能否正常供电；

（2）中线断开且一楼全部断开，二、三楼仍然接通（设二楼和三楼负载相同）情况下能否正常供电；

（3）若中线和一楼断开，二、三楼接通，但两层楼灯的数量不等（设二楼灯的数量为三层的 1/4）情况下能否正常供电？

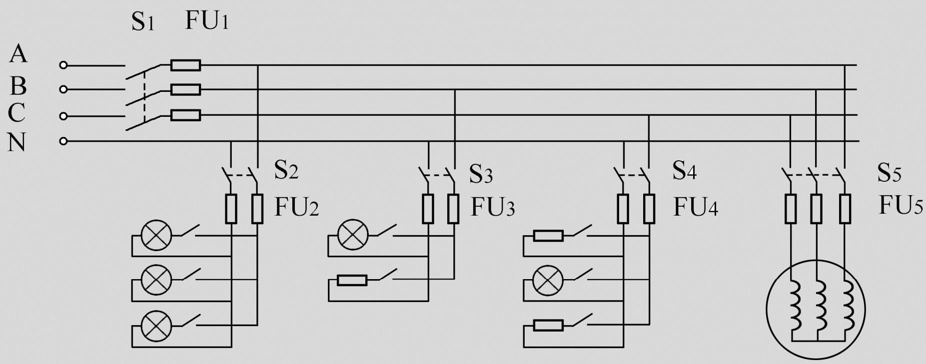


图 4.20　实用三相四线制接线示意图

解：（1）三相负载对称的情况下，中线电流等于 0，此时断开中线不影响三层楼正常供电。

（2）中线和一楼全部断开后，二楼和三楼灯为串联关系，串联后电压为线电压 380V。这时两相负载对称，则每相负载的电压为 190V，即二楼和三楼电灯两端电压均为 190V，电灯变暗，不能正常工作。

（3）中线和一楼全部断开后，二楼和三楼灯为串联关系，串联后电压为线电压 380V。这时两相负载不对称，二楼灯的数量为三层的 1/4，由于电灯为并联关系，所以二楼负载为三楼负载的 4 倍，所以二楼电灯两端电压为 $380\times\frac{4}{5}=304\text{V}$，三楼电灯两端电压为 76V，结果：二楼灯泡的电压超过额定电压，灯泡被烧毁；三楼的灯不亮。

例 4.6 某幢楼房有三层，计划在每层安装 10 盏 220V、100W 的白炽灯，用 220V/380V 的三相四线制电源供电。试求：

（1）画出合理的电路图；

（2）若所有白炽灯同时点亮，求线电流和中线电流；

（3）如果只有第一层和第二层白炽灯点亮，求中线电流。

解：（1）电路为 Y_0 形连接，如图 4.21 所示。

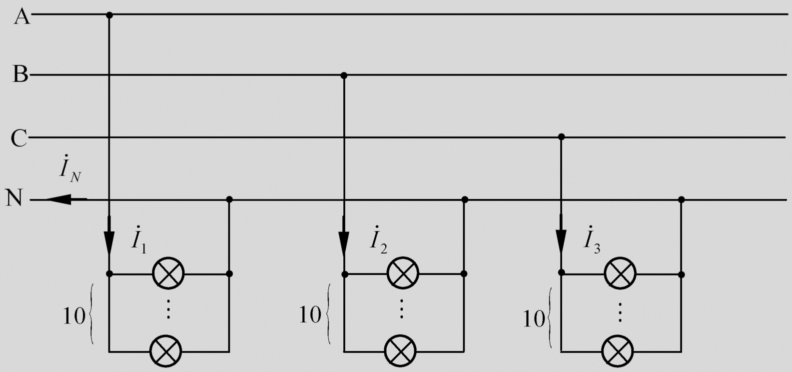


图 4.21 例 4.6 图

(2) 每相 10 盏白炽灯负载的等效电阻为

$$R = \frac{\frac{U^2}{P}}{n} = \frac{\frac{220^2}{100}}{10} = 48.4\Omega$$

$$I_1 = I_p = \frac{U_p}{R} = \frac{220}{48.4} = 4.55\text{A}$$

因负载对称，所以中线电流为

$$I_N = 0\text{A}$$

(3) 设 $\dot{U}_A = 220\angle 0^\circ \text{V}$，则

$$\dot{I}_1 = 4.55\angle 0^\circ \text{A}$$

$$\dot{I}_2 = 4.55\angle -120^\circ \text{A}$$

$$\dot{I}_3 = 0\text{A}$$

中线电流为

$$\dot{I}_N = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3 = 4.55 + 4.55\angle -120^\circ = 4.55\angle -60^\circ \text{A}$$

例 4.7 现有三幢学生宿舍楼，所用 220V、40W 日光灯，其功率因数为 0.5，三幢楼的日光灯分别接在 ABC 三相电源上（线电压为 380V），A 相接 200 盏灯，B 相接 240 盏灯，C 相接 180 盏灯。问每相负载相电流与线电流分别是多少?

解：由题意知该电路为三相四线制电路，电源相电压为 220V，则三相负载相电流分别为

$$I_{la} = 200 \times \frac{P}{U\cos\varphi} = 200 \times \frac{40}{220 \times 0.5} = 72.7\text{A}$$

$$I_{lb} = 240 \times \frac{P}{U\cos\varphi} = 240 \times \frac{40}{220 \times 0.5} = 87.3\text{A}$$

$$I_{lc}=180\times\frac{P}{U\cos\varphi}=180\times\frac{40}{220\times0.5}=65.5\text{A}$$

三相四线制电路，所以线电流分别为

$$I_A=I_{la}=72.7\text{A}$$

$$I_B=I_{lb}=87.3\text{A}$$

$$I_C=I_{lc}=65.5\text{A}$$

例 4.8 有一台三相异步电动机 Y-132M-4，额定功率为 7.5kW，额定效率为 87%，额定功率因数 0.85，额定线电压 380V，三相绕组为三角形连接。试求该电动机额定负载时的线电流、相电流、有功功率、无功功率及视在功率。

解：三相异步电动机输入有功功率为

$$P=P_N/\eta_N=7.5\times10^3/0.87=8621\text{W}$$

$$I_L=\frac{P}{\sqrt{3}U_N\cos\varphi_L}=\frac{8621}{\sqrt{3}\times380\times0.85}=15.41\text{A}$$

$$I_P=\frac{I_L}{\sqrt{3}}=8.9\text{A}$$

$$Q=\sqrt{3}U_LI_L\sin\varphi=5345\text{var}$$

$$S=\sqrt{3}U_LI_L=10143.5\text{VA}$$

例 4.9 图 4.22 所示三相电路中，在正常工作时电流表的读数为 26A，电压表的读数是 380V，各负载相电流为多少？若 A、B 间负载断路或者 A 相输电线断开，各负载相电流又为多少？

解：各相电流及线电流的参考方向如图 4.23（a）所示，由题设，I_A=26A，U_{AB}=380V，则

$$I_C=I_B=I_A=26\text{A}$$

$$I_{CA}=I_{BC}=I_{AB}=\frac{U_{AB}}{|Z|}=\frac{1}{\sqrt{3}}I_A=\frac{26}{\sqrt{3}}=15\text{A}$$

即各相电流为 15A。

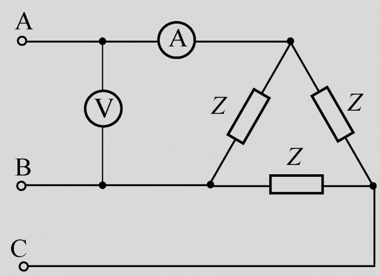


图 4.22　例 4.9 图

若 A、B 间负载断路，如图 4.23（b）所示，其他两相负载没有变化，则

$$I_{AB} = 0A$$

$$I_{BC} = \frac{1}{\sqrt{3}} I_B = 15A$$

$$I_{CA} = \frac{1}{\sqrt{3}} I_C = 15A$$

若 A 相输电线断开，如图 4.23（c）所示，则

$$I_{BC} = \frac{U_{BC}}{|Z|} = \frac{1}{\sqrt{3}} I_A = 15A$$

$$I_{AB} = I_{CA} = \frac{U_{BC}}{2|Z|} = 7.5A$$

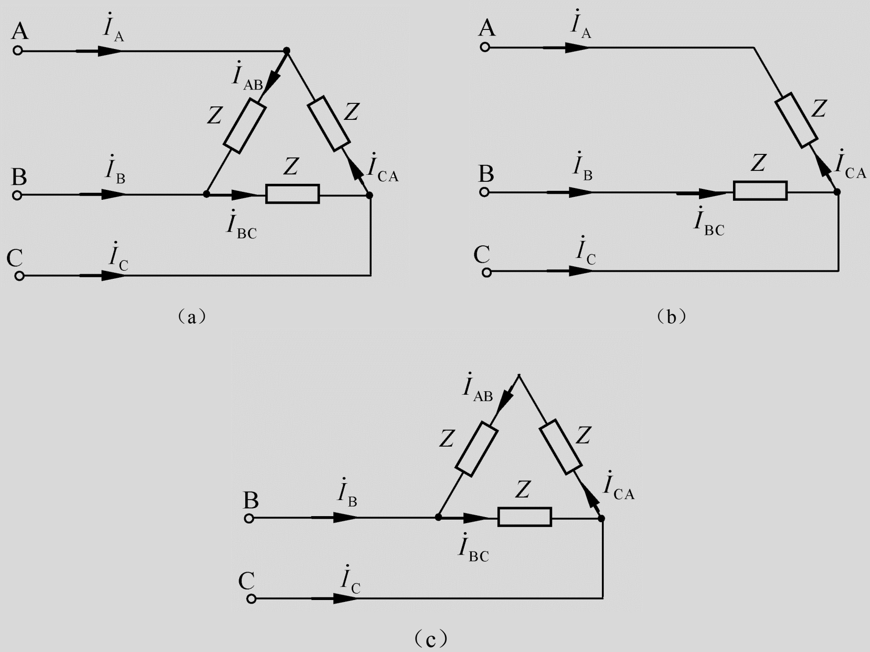


图 4.23　例 4.9 解图

例 4.10 有一台 Y 形连接的三相电动机，接到线电压为 380V 的对称三相电源上，电动机吸收的功率为 5.3kW，$\cos\varphi = 0.8$，$\varphi > 0$，求线电流的有效值、电动机的无功功率和视在功率。

解：$P = \sqrt{3} U_L I_L \cos\varphi = \sqrt{3} \times 380 \times I_L \times 0.8 = 5300W$

$$I_L = 10A$$

$$Q = \sqrt{3} U_L I_L \sin\varphi = \sqrt{3} \times 380 \times 10 \times 0.6 = 3949\text{var}$$

$$S = \sqrt{3} U_L I_L = \sqrt{3} \times 380 \times 10 = 6504\text{VA}$$

例 4.11 当使用工业三相电阻炉时，常常采取改变电阻丝的接法来调节加热温度。今有一台三相电阻炉，每相电阻为 8.68Ω，计算：线电压为 380V 时，电阻炉为△形和 Y 形连接的功率各是多少?

解：(1) 电阻炉为△形连接时

$$U_{\mathrm{p}} = U_{\mathrm{L}} = 380\mathrm{V}$$

$$I_{\mathrm{p}} = \frac{U_{\mathrm{p}}}{R} = \frac{380}{8.68} = 43.8\mathrm{A}$$

$$P = 3U_{\mathrm{p}}I_{\mathrm{p}} = 3\times380\times43.8 = 49908\mathrm{W}$$

(2) 电阻炉为 Y 形连接时

$$U_{\mathrm{p}} = \frac{U_{\mathrm{L}}}{\sqrt{3}} = 220\mathrm{V}$$

$$I_{\mathrm{p}} = \frac{U_{\mathrm{p}}}{R} = \frac{220}{8.68} = 25.3\mathrm{A}$$

$$P = 3U_{\mathrm{p}}I_{\mathrm{p}} = 3\times220\times25.3 = 16728\mathrm{W}$$

例 4.12 图 4.24 对称三相电路中，$U_{\mathrm{A'B'}} = 380\mathrm{V}$，三相电动机吸收的功率为 $1.4\mathrm{kW}$，其功率因数 $\lambda = 0.866$（滞后），$Z_1 = -\mathrm{j}55\Omega$。求 U_{AB} 和电源端的功率因数 λ'。

解：图 4.24 为对称三相电路，可以归结为一相电路的计算，如图 4. 25 所示。

令 $\dot{U}_{\mathrm{A'N'}} = \dfrac{U_{\mathrm{A'B'}}}{\sqrt{3}}\angle 0^\circ = 220\angle 0^\circ\,\mathrm{V}$。由已知条件可求得线电流 I_{A} 为

$$I_{\mathrm{A}} = \frac{P}{3U_{\mathrm{A'N'}}\cos\varphi} = \frac{1400}{3\times220\times0.866} = 2.45\ \mathrm{A}$$

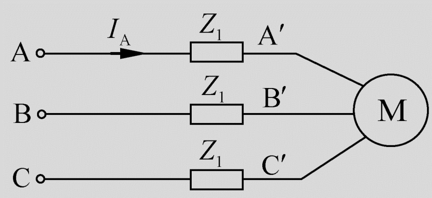


图 4.24　例 4.12 图

而负载 Z（为三相电动机每相的阻抗）的阻抗角为

$$\varphi = \psi_u - \psi_i = \arccos 0.866 = 30^\circ$$

则

$$\psi_i = -30^\circ$$

故

$$\dot{I}_A = 2.45\angle -30^\circ\ \mathrm{A}$$

根据一相计算电路，有电源端相电压 $\dot{U}_{AN}$ 为

$$\dot{U}_{AN} = Z_1\dot{I}_A + \dot{U}_{A'N'}$$
$$= 55\angle 9-0^\circ \times 2.45\angle -30^\circ + 220\angle 0^\circ = 192.13\angle -37.4^\circ \text{V}$$

则电源端线电压 $\dot{U}_{AB}$ 为

$$\dot{U}_{AB} = \sqrt{3}\dot{U}_{AN}\angle 30^\circ = 332.78\angle -7.4^\circ \text{V}$$

电源端的功率因数为

$$\lambda' = \cos(-37.4^\circ + 30^\circ) = \cos(-7.4^\circ) = 0.9917 \text{（超前）}$$

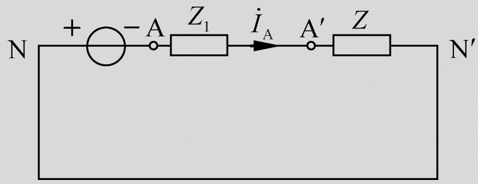


图 4.25　例 4.12 解图

本 章 小 结

本章主要介绍了三相交流电路的基本概念和分析方法。电力系统普遍采用三相电路。在正常情况下，三相电源的电压是对称的，即各相电压的幅值相等、频率相同、相位互差 120º 。三相电源的连接有星形和三角形两种形式。星形连接时，线电压有效值为相电压有效值的 $\sqrt{3}$ 倍，且线电压超前相电压 30º ；电源作三角形连接时，线电压等于相电压。

三相负载亦有星形和三角形两种连接形式，至于以哪种方式连接，则应根据负载的额定电压和电源电压的数值而定。当负载接成星形时，其线电流等于其对应相电流。若负载对称，则中线电流为零，故可取消中线，构成三相三线制电路，其计算方法可先计算一相，另两相推之。若负载不对称，则中线电流不为零，应采用三相四线制电路，其计算方法必须每相分别计算，再求出中线电流。对称负载接成三角形时，其线电流有效值为相电流有效值的 $\sqrt{3}$ 倍，且线电流滞后相电流 30º ，计算时也可以先求出一相电流，另两相电流推之。

三相负载的有功功率和无功功率分别等于每相负载的有功功率和无功功率之和，若负载对称时，则有如下计算公式

$$P = 3U_P I_P \cos\varphi = \sqrt{3}U_L I_L \cos\varphi$$
$$Q = 3U_P I_P \sin\varphi = \sqrt{3}U_L I_L \sin\varphi$$
$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = 3U_P I_P = \sqrt{3}U_L I_L$$

上式对星形连接和三角形连接的三相负载均适用。应当注意：式中 U_L、I_L 分别为线电压和线电流，而 φ 角则是相电压与相电流的相位差。

习　题　4

4.1　填空题

（1）三相电源和三相负载分别有______________和______________两种基本连接方法。

（2）三相交流电路的连接可分为_______、_______、_______、______和______等方法。

（3）______________相同、______________相等、______________的三相电源，称为对称三相电源。

（4）对称三相电压的表达式为：$u_A = U_m \sin \omega t$；则 $u_B =$___________；$u_C =$___________。

（5）　　　　　　　　称为相序。相序有　　　　　　　　　和　　　　　　　　　两种。

（6）在相位上 u_A 超前 u_B 120º，u_B 超前 u_C 120°，这时三相电压的相序是______________，称为___________；若把 B 相与 C 相对调，则相序是__________，这种相序称为__________。

（7）______________和______________所构成的三相电路称为对称三相电路。

（8）三相电路中相电流是指流过_________上的电流，线电流是指流过_________上的电流，中线电流是指流过_________上的电流。线电压是指_________与_______之间的电压，相电压是指_________与________之间的电压。

（9）对称三相电路中，当负载采用星形连接时，线电流是相电流的_________倍，线电压是相电压的_________倍。中线电流等于_________。相位上，线电压总是_____于相应的相电压_________。

（10）对称三相电路中，当负载采用三角形连接时，线电流是相电流的_________倍，线电压是相电压的_________倍。相位上，线电流总是_________于相应的相电流_________。

（11）为了防止中线断开，中线上不允许装设_________和_________，而且中线连接要可靠，并具有一定的机械强度。

（12）三相电路的瞬时功率不论电路对称与否，都等于___________；三相电路的有功功率不论三相负载采用何种接法、电路对称与否，都等于____________；同样，总的无功功率等于_________。

（13）四种触电方式分别为_________、_________、_________和_________。

（14）减小跨步电压的方法是________________。

（15）接地保护是_________________________。

（16）接零保护是_________________________。

（17）静电的防护方法是___________和__________。

4.2　星形连接的对称负载，每相阻抗为 $Z = 10\angle 30°\Omega$，电源线电压为 190V，求各相电流相量（以 $\dot{U}_A$ 作为参考相量）。

4.3　在三相对称电路中，电源线电压为 380V，每相负载电阻 $R = 10\Omega$。试求负载分别接成星形和三角形时的线电流和相电压。

4.4　对称三相四线制电路，电源线电压的有效值为 380V，$Z = (6 + j8)\Omega$，求线电流。

4.5　对称三相电路如图 4.26 所示，已知 $\dot{U}_{AB} = 380\angle 30°V$，$Z = (8 - j6)\Omega$，求下列情况下的线电流：

（1）$Z_1 = 0$；

（2）$Z_1 = \mathrm{j}2\Omega$。

4.6　对称三相电源向三角形连接的负载供电，如图 4.27 所示，已知三相负载对称，$Z_1 = Z_2 = Z_3$，各电流表读数均为 1.73A，突然负载 Z_3 断开，此时三相电源不变，问各电流表读数如何变化，是多少？

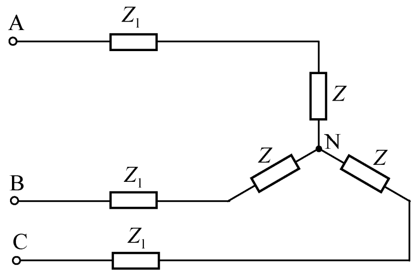


图 4.26　习题 4.5 图

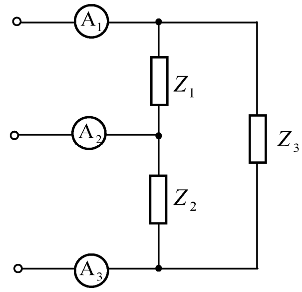


图 4.27　习题 4.6 图

4.7　已知不对称三相四线制电路中，对称三相电源的线电压为 380V，不对称的星形连接负载分别是 $Z_A = 6 + \mathrm{j}8\Omega$，$Z_B = -\mathrm{j}8\Omega$，$Z_C = j10\Omega$，试求各相电流、线电流及中线电流并画出相量图。

4.8　已知三相对称电源的相电压为 220V。A 相接入一只 220V、40W 的灯泡，B、C 相各接入一只 220V、100W 灯泡，当中线断开后，试求各灯泡的电压。

4.9　对称三相感性负载，接于线电压为 220V 的三相电源上，线电流为 5A，负载功率因数 $\cos\varphi$=0.8，求电路的有功功率和无功功率及视在功率。

4.10　有一台Y形连接的三相电动机，接到线电压为 380V 的对称三相电源上，电动机吸收的功率为 5.3kW，$\cos\varphi = 0.8$，$\varphi>0$，求线电流的有效值、电动机的无功功率。

4.11　当使用工业三相电阻炉时，常常采取改变电阻丝的接法来调节加热温度。今有一台三相电阻炉，每相电阻为 8.68Ω，计算：线电压为 380V 时，电阻炉为△形和Y形连接的功率各是多少？

4.12　对称三相电源向对称Y形连接的负载供电，如图 4.28 所示，当中线开关 S 闭合时，电流表读数为 2A。试求：

（1）若开关 S 打开，电流表读数是否改变，为什么？

（2）若 S 闭合，A 相负载 Z 断开，电流表读数是否改变，为什么？

4.13　如图 4.29 所示电路中，对称负载为△形连接，已知对称三相电源线电压等于 220V，电流表读数等于 17.3A，三相负载的有功功率为 4.5kW，求每相负载的电阻和感抗。

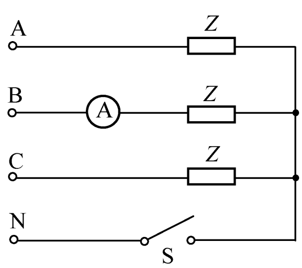


图 4.28　习题 4.12 图

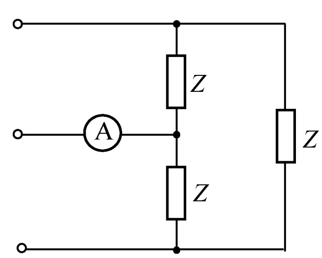


图 4.29　习题 4.13 图

第 5 章　三相异步电动机及其简单控制

三相异步电动机是目前工农业生产及日常生活中应用最广泛的机电能量转换装置。本章主要在介绍三相异步电动机的基本构造、转动原理、机械特性及技术数据基础上，对常用低压电器元件的工作原理及使用方法、三相异步电动机的继电-接触控制原理和典型控制电路做简要介绍。本章是学习和应用电气控制技术的基础。

5.1　三相异步电动机的基本构造

电机是利用电磁原理进行机电能量转换的装置。把机械能转换成电能的电机，称为发电机；把电能转化为机械能的装置，称为电动机。按照所消耗电能的种类不同，电动机可分为直流电动机和交流电动机两种。交流电动机又可分为异步电动机和同步电动机。

异步电动机是把交流电能转换为机械能的一种动力装置。异步电动机具有结构简单、价格便宜、运行可靠、维护方便等优点，能够满足大多数生产机械的传动要求，因而在工农业生产及日常生活中得到广泛应用。

三相异步电动机由固定不动的定子和可以旋转的转子两个基本部分组成，定子和转子之间由气隙分开。此外，还有端盖、风扇、接线盒等其他附件，如图 5.1 所示。

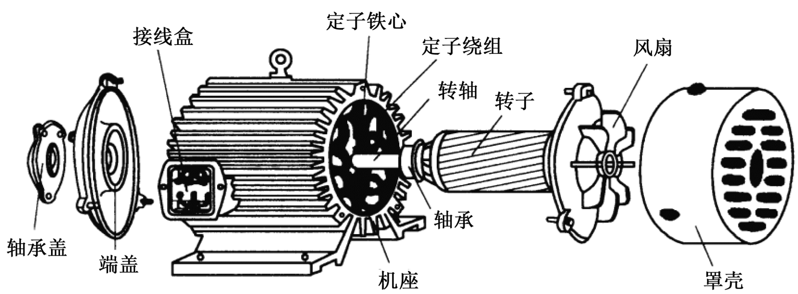


图 5.1　三相异步电动机构造

5.1.1　定子

三相异步电动机的定子主要由机座、定子铁心和定子绕组组成。

机座是电动机的支架，一般为铸铁或铸钢铸造而成，起支撑和保护作用。

定子铁心是电机磁路的一部分，由互相绝缘的圆环形硅钢片叠压而成。铁心内壁均匀分布若干冲槽，用于存放定子绕组。

定子绕组是电动机的电路部分，嵌放在定子铁心槽中。三相异步电动机的定子绕组是三相对称分布绕组，即每一相绕组的匝数、结构和形状相同，在沿定子铁心内圆周放置时，空间相位互差 120º。各相绕组之间及绕组与铁心之间都是绝缘的。每相绕组引出一个首端和一个末端，三相绕组共 6 个端子都引到接线盒中，按需要可以联成Y形或△形。

5.1.2　转子

三相异步电动机的转子由转子铁心、转子绕组和轴构成。转子铁心由彼此绝缘的硅钢片叠成圆筒形，套在转轴上，其外表面有很多均匀分布的冲槽，用于安放转子绕组，如图 5.2 所示。转子、气隙和定子铁心构成一个电动机的完整磁路。

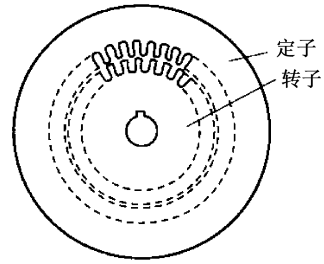
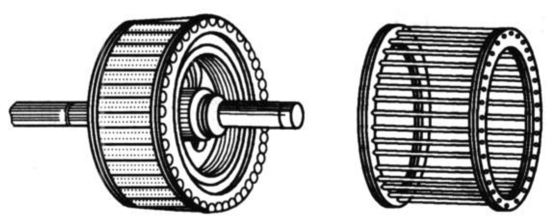


图 5.2　定子和转子的铁心片

根据构造的不同，转子绕组可分为鼠笼式和绕线式两种。鼠笼型转子绕组做成笼状，即在转子铁心槽内放铜条，铜条两端用端环连接，如图 5.3 所示；或在槽中浇铸铝液，将转子导条与端环铸在一起，铸成一鼠笼，如图 5.4 所示。目前中小型鼠笼式电动机的转子多是铸铝的。鼠笼式异步电动机是工农业生产中应用最广泛的一种电动机。



（a）鼠笼型绕组　　（b）转子外形

图 5.3　鼠笼型转子

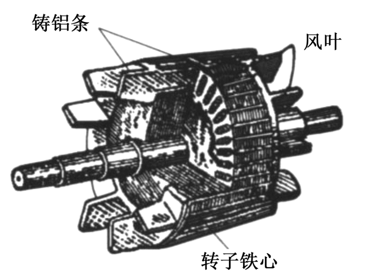


图 5.4　铸铝的鼠笼型转子

绕线式转子绕组同定子绕组一样，也是三相绕组，一般接成星形。每相的始端分别连接在三个铜制的滑环上，滑环固定在转轴上，如图 5.5 所示。环与环、环与转轴都互相绝缘。每个滑环上都用弹簧压着一个固定不动的电刷，转子转动时，滑环与电刷保持滑动接触。转子的三个始端通过电刷引到接线盒中，便于在转子回路接入附加电阻，改善电动机运行性能。

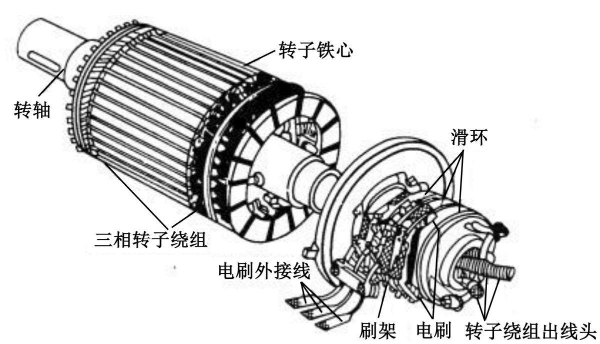


图 5.5　绕线式转子结构

鼠笼式异步电动机与绕线式异步电动机只是转子构造有所不同，它们的工作原理是一样的。绕线式异步电动机的结构比鼠笼式电动机的结构复杂，价格也较贵，但其启动转矩大，一般用于重载负荷。

5.2　三相异步电动机的工作原理

三相异步电动机定子三相绕组接至三相电源，产生旋转磁场，进而在转子上产生电磁转矩，使电动机转动起来。

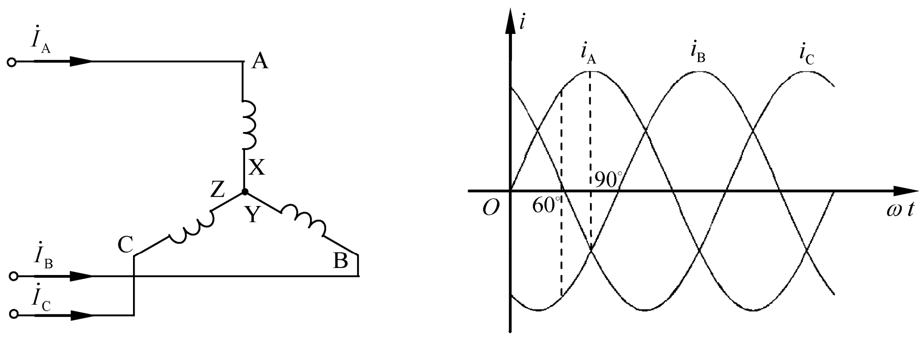
5.2.1　旋转磁场

1．旋转磁场的产生

三相异步电动机的定子绕组是由空间互差120°的三个完全相同的线圈组成的。为便于分析，将三相绕组分别标记为 A-X、B-Y 和 C-Z，并将三相绕组连接成星形，并假定电流参考方向是从绕组的首端流向末端，如图 5-6（a）所示。将三相对称绕组接在三相交流电源上，绕组中便有三相对称电流产生，其函数表达式为

$$\left.\begin{aligned} i_{\rm A}(t) &= I_{\rm m}\sin\omega t \\ i_{\rm B}(t) &= I_{\rm m}\sin(\omega t - 120^\circ) \\ i_{\rm C}(t) &= I_{\rm m}\sin(\omega t + 120^\circ) \end{aligned}\right\} \qquad (5\text{-}1)$$

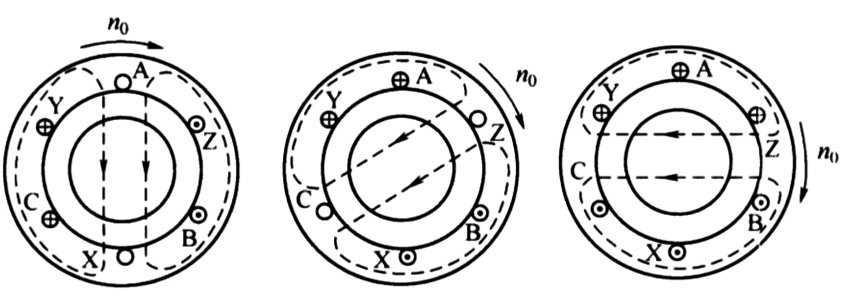
三相对称电流波形如图 5.6（b）所示。



（a）三相对称电流通入三相对称星接绕组　　（b）三相对称电流波形

图 5.6　三相对称电流

由于电流随时间而变化，所以电流流过线圈产生的磁场分布情况也是随时间变化的。在 $\omega t = 0°$ 时，$i_{\rm A}= 0$；$i_{\rm B}$ 是负的，其方向与参考方向相反，即自 Y 到 B；$i_{\rm C}$ 是正的，其方向与参考方向相同，即自 C 到 Z。根据右手螺旋定则可判断此时三相电流所产生的合成磁场方向，如图 5.7（a）所示，合成磁场轴线的方向是自上而下。



（a）$\omega t = 0°$　　（b）$\omega t = 60°$　　（c）$\omega t = 90°$

图 5.7　三相电流产生的旋转磁场（一对磁极）

图 5.7（b）所示的是 $\omega t = 60°$ 时定子绕组中电流的方向和三相电流的合成磁场的方向。与 $\omega t = 0°$ 相比，这时的合成磁场已在空间转过了 60°。同理可分析 $\omega t = 90°$ 时的三相电流的合成磁场，它比 $\omega t = 60°$ 时的合成磁场在空间又转过了 30°，如图 5.7（c）所示。

由上述分析可知，当三相对称绕组中通入三相交流电流时，所产生的合成磁场是随电流的交变而在空间不断旋转的磁场，即旋转磁场。

2．旋转磁场的转向

由图 5.7 可以看出，旋转磁场是沿着 A→B→C 方向旋转的，与三相绕组中对称三相电流的相序一致，即旋转磁场的转向由通入绕组的三相电流的相序决定。所以，可以通过改变三相绕组中电流的相序来改变旋转磁场的转向。异步电动机的反转就是利用这一原理实现的。任意对调两根三相电源接到定子绕组上的导线，就可以改变异步电动机的旋转方向。

3．旋转磁场的极数

三相异步电动机的极数就是旋转磁场的极数。旋转磁场的极数和三相绕组的安排有关。在图 5.7 所示情况下，每相绕组只有一个线圈，绕组的始端之间相差 120°空间角，则产生的旋转磁场具有一对极（或称两极旋转磁场），即 p=1（p 是磁极对数）。如将定子绕组安排成如图 5.8（a）所示，即每相绕组由两个线圈串联，绕组的始端之间相差 60°空间角，则产生的旋转磁场具有两对极（或称四极旋转磁场），即 p=2，其绕组连接方式如图 5.8（b）所示，所产生的四极旋转磁场如图 5.9 所示。

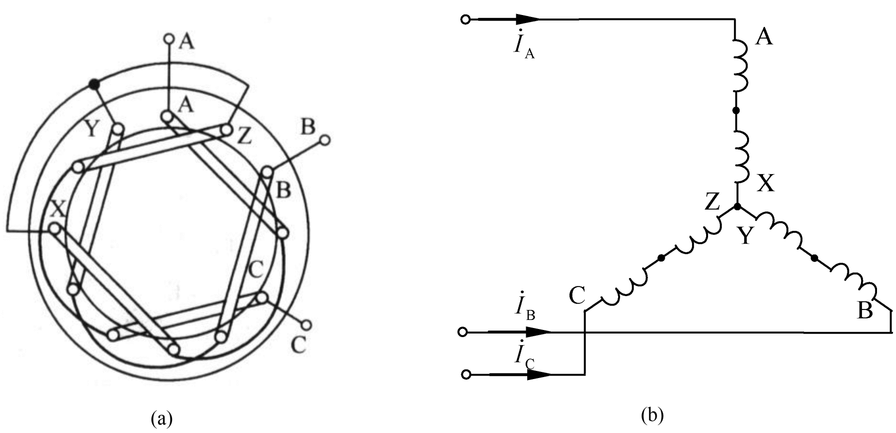


图 5.8　产生四极旋转磁场的定子绕组

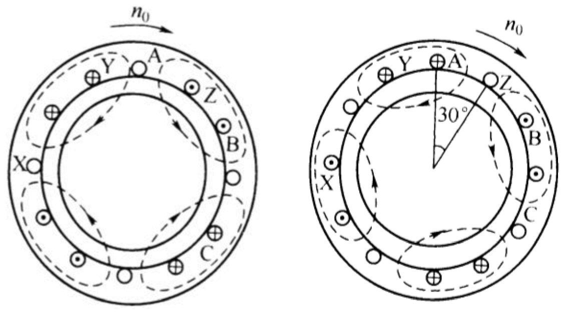
同理，如果要产生三对极，即 p=3 的旋转磁场，则每相绕组必须由均匀安排在空间的三个线圈串联，绕组的始端之间相差 40°（即 $120°/p$）空间角。

4．旋转磁场的转速

三相异步电动机的转速与旋转磁场的转速有关，而旋转磁场的转速决定于磁场的极对数。在一对极的情况下，由图 5.7 可见，当电流从 ωt =0°到 ωt=60°时，磁场在空间也旋转了 60°。当电流变化了一个周期时，磁场恰好在空间旋转了一周（也称一转）。设电流的频率为 f_1，则旋转磁场的转速为 $n_0=60f_1$。转速的单位为转/分（r/min）。

在旋转磁场具有两对极的情况下，由图 5.9 可见，当电流也从 ωt =0°到 ωt =60°时，

磁场在空间仅旋转了 30°。就是说，当电流变化了一周时，磁场仅旋转了半周，比 p=1 情况下的转速慢了一半，即 $n_0=60f_1/2$。



（a）$\omega t=0°$　（b）$\omega t=60°$

图 5.9　四极旋转磁场（ $p=2$ ）

进一步分析可推知，当电动机的合成旋转磁场具有 p 对磁极时，三相定子绕组电流变化一个周期所产生的合成磁场在空间转过一对磁极的角度，即 $1/p$ 周，所以旋转磁场的转速为

$$n_0=\frac{60f_1}{p}\text{(r/min)} \tag{5-2}$$

因此，旋转磁场的转速 n_0 取决于电流频率 f_1 和磁极对数 p。f_1 由异步电动机的供电电源频率决定，而 p 决定于三相绕组的结构。对某一异步电动机而言，f_1 和 p 通常是一定的，所以磁场转速 n_0 是个常数。

在我国，工频 f_1=50Hz，于是由式（5-2）可得出对应于不同极对数 p 的同步转速 n_0，见表 5.1。

表 5.1　不同极对数 p 的旋转磁场转速 n_0

p	1	2	3	4	5	6
n_0 （r/min）	3000	1500	1000	750	600	500

5.2.2　工作原理

图 5.10 是三相异步电动机工作原理示意图。图中转子只标出两根导条，N、S 表示两极旋转磁场，以恒定转速 n_0 顺时针方向旋转。

当三相定子绕组接至三相电源后，三相绕组内将流过三相电流并在电机内建立旋转磁场。当旋转磁场按顺时针方向旋转时，转子导条逆时针方向切割磁力线，在转子导条中产生感应电动势。根据右手定则可确定，N 极下的转子导条的感应电动势的方向是向外的，而 S 极下的转子导条的感应电动势的方向是向里的。

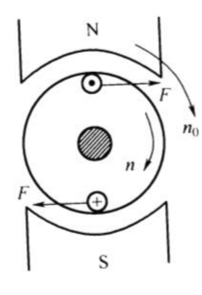


图 5.10　三相异步电动机工作原理图

由于转子绕组自身闭合，在感应电动势的作用下，转子导条中便有感应电流通过，即产生转子电流。载流转子导条与旋转磁场相互作用，使转子导条受到电磁力 F 的作用。电磁力的方向可用左手

定则来确定。每个载流导条在旋转磁场作用下受到的电磁力对转子转轴形成转矩，称之为电磁转矩。在电磁转矩的作用下，转子就转动起来。由图 5.10 可见．转子转动的方向和磁极旋转的方向相同。

由上述分析可以看出，异步电动机的转动是由于电磁转矩的作用，而电磁转矩的产生是由于转子导条与定子旋转磁场间存在相对运动。如果转子转速达到旋转磁场转速，转子与旋转磁场之间就没有相对运动，转子导条将不切割磁力线，转子电动势、转子电流以及电磁转矩也就都不存在。这样，转子就不可能继续转动。所以，异步电动机的转速 n 恒小于旋转磁场的转速 n_0，这是异步电动机旋转的必要条件，异步电动机名称也由此而来，而旋转磁场的转速 n_0 常称为同步转速。

异步电动机的转速差（$n_0 - n$）与旋转磁场 n_0 的比率，称为转差率，用 s 表示为

$$s = \frac{n_0 - n}{n_0} \tag{5-3}$$

由于 $n < n_0$ 且 $n > 0$，故 $0 < s < 1$。转差率是异步电动机的一个重要参数，它与负载情况有关。负载越大，转速越慢，转差率就越大；负载越小，转速越快，转差率就越小。由于三相异步电动机的额定转速与同步转速相近，所以它的额定转差率很小。通常异步电动机在额定负载时的转差率约为 0.01～0.07。

例 5.1 有一台三相异步电动机，其额定转速 n =1440r/min。试求电动机的极对数和额定负载时的转差率。电源频率 f_1=50Hz。

解：由于电动机的额定转速接近而略小于同步转速，而同步转速对应于不同的极对数有一系列固定的数值（见表 5-1）。显然，与 1440r/min 最相近的同步转速 n_0 =1500r/min，所以电动机的磁极对数为

$$p = \frac{60 f_1}{n_0} = \frac{60 \times 50}{1500} = 2$$

额定负载时的转差率为

$$s = \frac{n_0 - n}{n_0} = \frac{1500 - 1440}{1500} = 0.04$$

5.3　三相异步电动机的转矩

5.3.1　三相异步电动机的电路分析

异步电动机的定子与转子间只有磁的耦合，没有电的联系。异步电动机通过电磁感应把定子边的电功率转换成转子边的机械功率。

1．定子电路

异步电动机的定子绕组是静止的，所以旋转磁场产生的感应电动势的频率等于电源频率 f_1。异步电动机气隙的旋转磁场切割定子绕组在其中产生感应电动势 e_1，定子绕组中每相感应电动势的有效值为

$$E_1 = 4.44 f_1 K_1 N_1 \Phi \tag{5-4}$$

式中，f_1 为电源频率；K_1 为定子绕组系数，小于 1 的常数；N_1 为每相绕组的串联匝数；Φ 为旋转磁场每极磁通；U_1 为定子绕组相电压的有效值。

忽略定子漏磁场对定子绕组的作用，$U_1 \approx E_1$，即

$$U_1 \approx 4.44 f_1 K_1 N_1 \Phi \tag{5-5}$$

由此可见，当 $f_1K_1N_1$ 一定时，旋转磁场每极磁通 Φ 的大小取决于定子电压 U_1，无论有无负载，只要 U_1 一定，Φ 也一定。

2．转子电路

（1）转子频率 f_2 与 s 的关系。

转子绕组中的感应电动势 e_2 和电流 i_2 是旋转磁场相对切割转子绕组导条感应产生的，转子感应电动势的频率取决于旋转磁场同转子的相对速度和磁极对数。旋转磁场切割转子绕组导体的速度为 $n_0 - n$，则转子感应电动势的频率为

$$f_2 = \frac{p(n_0 - n)}{60} = \frac{p \cdot n_0}{60} \cdot \frac{n_0 - n}{n_0} = sf_1 \tag{5-6}$$

即转子电流频率 f_2 与转差率 s 成正比。

转子静止时（启动瞬间或堵转状态），$n = 0$，$s=1$，$f_2 = f_1$。

（2）电动势 E_2 与 s 的关系。

旋转磁场的主磁通 Φ 在每相转子绕组产生感应电动势 $e_2 = -N_2 \dfrac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t}$，其有效值为

$$E_2 = 4.44 f_2 K_2 N_2 \Phi = 4.44 s f_1 K_2 N_2 \Phi = sE_{20} \tag{5-7}$$

其中 $E_{20} = 4.44 f_1 K_2 N_2 \Phi$ 是转子静止时的感应电动势，也是转子绕组中感应电动势的最大有效值。由式（5-7）可见，转子感应电动势与转差率有关。

（3）$\cos\varphi_2$、I_2 与 s 的关系。

图 5.11 为转子电路的等效电路，其中 R_2 为转子电路的每相电阻，X_2 为转子电路每相漏电抗，且

$$X_2 = 2\pi f_2 L_2 = 2\pi s f_1 L_2 = sX_{20} \tag{5-8}$$

式中 L_2 为转子每相漏磁电感；$X_{20} = 2\pi f_1 L_2$ 为转子静止时的每相感抗。由式（5-8）可见，转子漏抗也与转差率有关。

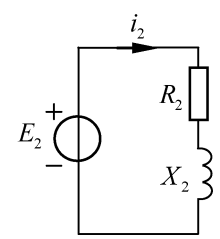


图 5.11　转子等效电路

转子每相阻抗为

$$|Z_2| = \sqrt{R_2^2 + X_2^2} = \sqrt{R_2^2 + (sX_{20})^2} \tag{5-9}$$

转子回路的功率因数为

$$\cos\varphi_2 = \frac{R_2}{|Z_2|} = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + (sX_{20})^2}} \tag{5-10}$$

转子每相电流有效值为

$$I_2 = \frac{E_2}{|Z_2|} = \frac{sE_{20}}{\sqrt{R_2^2 + (sX_{20})^2}} \tag{5-11}$$

由上述分析可知，由于转子是旋转的，转子电路的各个物理量，如电动势、电流、频率、感抗及功率因数等都与转差率有关，也即与电动机转速有关。这是学习三相异步电动机时应注意的一个重要特点。

5.3.2　电磁转矩

三相异步电动机的电磁转矩是旋转磁场和转子电流相互作用形成的，因此电磁转矩的大小与转子电流以及旋转磁场每极磁通成正比。由于转子回路漏抗的存在，转子电流 I_2 与转子感应电动势 E_2 之间有一个相位差，于是转子电流可以分为有功分量和无功分量两部分。只有转子电流的有功分量才能与旋转磁场相互作用而产生电磁转矩，于是，电磁转矩可描述如下

$$T = K_{\mathrm{T}}\Phi I_2 \cos\varphi_2 \tag{5-12}$$

式中，K_{T} 为与电动机结构有关的常数；Φ 为旋转磁场每极的磁通量；I_2 为转子相电流的有效值；$\cos\varphi_2$ 为转子回路的功率因数，其中 φ_2 是转子相电流 I_2 滞后于同相绕组中感应电动势 E_2 的相位差角。

由式（5-5）可得

$$\Phi = \frac{U_1}{4.44 f_1 K_1 N_1} \tag{5-13}$$

将（5-10）、式（5-11）和式（5-13）代入式（5-12）中，加以整理后可得

$$T = K_{\mathrm{T}}' \frac{sR_2U_1^2}{R_2^2 + (sX_{20})^2} \tag{5-14}$$

式中，K_{T}' 为常数。

式（5-14）称为异步电动机电磁转矩的参数表达式，由此可知，电磁转矩 T 与定子相电压 U_1 的平方成正比，因此电磁转矩对电源电压特别敏感，电源电压的波动将会引起电磁转矩的较大变化。此外，电磁转矩还与转差率 s 及转子参数有关。

电动机的转子参数 R_2 和 X_{20} 可以看作常数，若电动机电源电压 U_1 及其频率 f_1 不变，则式（5-14）表示的电磁转矩与转差率的关系可用图 5.12 所示曲线表示，这条 $T = f(s)$ 的曲线称为电机的转矩特性曲线。

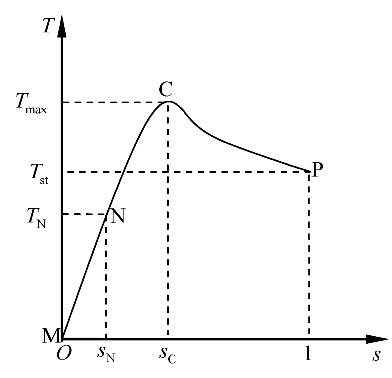


图 5.12　转矩特性曲线

从图 5.12 可以看出，当 s＝0（即 n＝n_0）时，电动机不产生电磁转矩，即 $T = 0$。这种情况是电动机在无负载且本身无机械损耗的理想空载状态下的运行情况。当 $s = s_{\mathrm{C}}$ 时，电磁转矩达最大值 $T_{\max}$。通常将最大转矩 $T_{\max}$ 对应的转差率 s_{C} 称为临界转差率。令 $\mathrm{d}T/\mathrm{d}s = 0$ 可得

$$s_{\mathrm{C}} = \frac{R_2}{X_{20}} \tag{5-15}$$

将式（5-15）代入式（5-14）的电磁转矩参数表达式，可得

$$T_{\max} = K_{\mathrm{T}}' \frac{U_1^2}{2X_{20}} \tag{5-16}$$

通过上述分析可知，$T_{\max}$ 正比于 U_1^2 而与 R_2 无关，s_{C} 正比于 R_2 而与 U_1 无关。所以当转子回路电阻改变时，电动机的最大转矩 $T_{\max}$ 不变，但对应临界转差率 s_{C} 不同；而当调节定子相电压时，最大转矩 $T_{\max}$ 随之变化，但对应临界转差率 s_{C} 不变。

$T_{\max}$ 对电动机的稳定运行具有重要意义。当负载转矩发生变化时，只要不超过最大电磁转矩 $T_{\max}$，电动机便可运行。如若负载转矩大于最大电磁转矩，电动机无法带动负载转动，使电流急剧上升，导致电动机过热，以致烧坏。若是短时过载，电动机的最大过载可接近最大转矩，由于时间短，电动机不至于立即过热。

为保证电动机的稳定运行，要求电动机有一定的过载能力，使其不因短时过载而停转。通常用最大转矩与额定转矩之比来表示过载能力，令

$$\lambda = \frac{T_{\max}}{T_{\mathrm{N}}} \tag{5-17}$$

式中，λ 称为电动机的过载系数，一般三相异步电动机的过载系数为 1.8～2.2。

在选用电动机时，必须考虑可能出现的最大负载转矩，然后根据所选电动机的过载系数计算出电动机的最大电磁转矩，它必须大于最大负载转矩。

5.4　三相异步电动机的机械特性

在电气传动系统中，电动机的机械特性具有更实际的意义。机械特性是指电动机转速 n 与转矩 T 之间的关系特性，三相异步电动机的机械特性曲线如图 5.13 所示。

机械特性曲线上的 C 点对应最大转矩 $T_{\max}$，称为临界点。临界点把机械特性曲线分为变化规律不同的两段曲线，对应两个不同的工作区：稳定工组区和不稳定工作区。

三相异步电动机通常运行在机械特性曲线的 MC 段，称稳定工作区。在这个区域内，当作用在电动机轴上的负载转矩变化时，电动机能适应负载的变化而自动调节达到稳定运行。如当负载转矩增大时，在最初瞬间 $T < T_{\mathrm{L}}$，所以转速 n 开始下降，但电动机的电磁转矩随着转速的下降而增大。当 $T = T_{\mathrm{L}}$ 时，电动机又达到新的稳定运行状态，但这时的转速较前一状态低。在稳定工作区内，当负载在空载与额定值之间变化时，电动机的转速变化不大，这种特性称为硬机械特性。

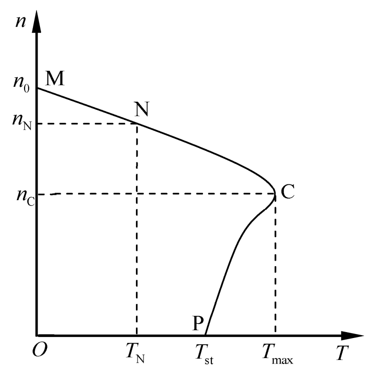


图 5.13　机械特性曲线

机械特性曲线的 CP 段为不稳定工作区。在此区域内，当负载转矩增大时，由于在最初瞬间电磁转矩小于负载转矩，电动机的转速降低，而电磁转矩随转速的降低进一步减小，使转速又进一步降低，最后直至电动机停止转动。

机械特性曲线上的 N 点为额定工作点，对应额定转矩 T_{N} 和额定转速 n_{N}。一般电动机的铭牌上或产品

手册上没有 T_N，而有轴上输出额定机械功率 P_N，额定转速 n_N 等技术数据。额定转矩可根据铭牌数据通过下述关系求得

$$P_N = T_N \omega_N \tag{5-18}$$

或

$$T_N = 9550 \frac{P_N}{n_N} \tag{5-19}$$

式中，额定功率 P_N 的单位是 kW；额定转速 n_N 的单位 r/min；T_N 的单位是 N·m。

异步电动机工作于额定工作点或附近点时，其效率及功率因数均较高。若 $T_L > T_N$，则电机处于过载状态，电机将发热，绝缘材料将加速老化，长时间过载，将缩短电动机的使用寿命。因此在实际应用中，应尽量避免过载。在温升允许的情况下，可以短时间过载，但负载转矩不得超过最大转矩 T_{max}，否则就会发生“堵转”而烧毁电机。当 $T_L << T_N$ 时，电动机将处于轻载运行状态，若长期处于这种状态工作，对电机寿命没有影响，但其效率和功率因数都将大大低于额定值，使其能力不能充分发挥，俗称“大马拉小车”。因此要正确选用电动机，使电动机处于满载或接近满载的情况下运行。

图 5.13 中的 T_{st} 表示电机在启动瞬间具有的转矩，称为启动转矩。为了保证电动机的正常启动，启动转矩必须大于负载转矩。通常用启动转矩与额定转矩的比值 T_{st}/T_N 来衡量电机的启动能力。将 s=1 代入式（5-14）的电磁转矩表达式中，即可得出

$$T_{st} = \mathrm{K}_T^{'} \frac{R_2 U_1^2}{R_2^2 + X_{20}^2} \tag{5-20}$$

若 R_2、X_{20} 一定，则 T_{st} 正比于 U_1^2；若 U_1、X_{20} 一定，适当增大 R_2，T_{st} 也将随之增大。对于一般的三相异步电动机，T_{st}/T_N 约为 1.7～2.2。

例 5.2　已知 Y225S-4 型三相异步电动机，$P_N = 37\text{kW}$，$U_N = 380\text{V}$，$n_N = 1480r/\text{min}$，$I_N = 70.4\text{A}$，$\cos\varphi_N = 0.87$。若该电动机轴上的负载转矩 T_L 分别为以下三种情况，则该电动机都处于何种工作状态？①T_L＝238.75N·m；②T_L＝60N·m；③T_L＝286.5N·m。

解：先由式（5-19）计算出 T_N 为

$$T_N = 9550 \frac{P_N}{n_N} = 9550 \times \frac{37}{1480} = 238.75\text{N} \cdot \text{m}$$

情况①：T_L＝238.75 N·m＝T_N，所以该电动机处于满载运行状态，也即额定运行状态；
情况②：T_L＝60 N·m≈0.25 T_N，所以该电动机处于轻载工作状态，仅为额定负载的 1/4；
情况③：T_L =286.5 N·m＝1.2 T_N，所以该电动机处于超载状态，超载 20%。

例 5.3　例 5.2 中的三相异步电动机，过载系数 $T_{max}/T_N = 2.2$。如果轴上所带负载为冲击性的，负载转矩可能在瞬间会达到较大值，试分析在下列几种情况下，该电动机能否会发生堵转？①$T_{L\cdot max} = 400\text{N} \cdot \text{m}$；②$T_{L\cdot max} = 500\text{N} \cdot \text{m}$；③$T_{L\cdot max} = 540\text{N} \cdot \text{m}$。

解：先由过载系数 $\lambda = T_{max}/T_N = 2.2$ 求出该电动机的最大电磁转矩为

$$T_{max} = 2.2T_N = 2.2 \times 238.75 = 525.25\text{N} \cdot \text{m}$$

情况①：$T_{L\cdot max}=400N\cdot m<T_{max}$，故该电动机不能堵转；
情况②：$T_{L\cdot max}=500N\cdot m<T_{max}$，故该电动机也不会堵转；
情况③：$T_{L\cdot max}=540N\cdot m>T_{max}$，故该电动机可能堵转。

例 5.4　例 5.2 中的三相异步电动机，$T_{st}/T_N=1.9$。若在启动时，即 s=1 瞬间，轴上的负载转矩分别如下，试分析该电动机能否顺利启动起来？① $T_{L\cdot st}=300N\cdot m$；② $T_{L\cdot st}=400N\cdot m$；③ $T_{L\cdot st}=460N\cdot m$。

解：先由 $T_{st}/T_N=1.9$ 求出该电动机的启动转矩为

$$T_{st}=1.9T_N=1.9\times 238.75\approx 454N\cdot m$$

情况①：$T_{L\cdot st}=300N\cdot m<T_{st}$，故该电动机能顺利启动；
情况②：$T_{L\cdot st}=400N\cdot m<T_{st}$，故该电动机也能顺利启动；
情况③：$T_{L\cdot st}=460N\cdot m>T_{st}$，故该电动机不能启动，启动时发生堵转。

5.5　三相异步电动机的选择

5.5.1　三相异步电动机的铭牌数据

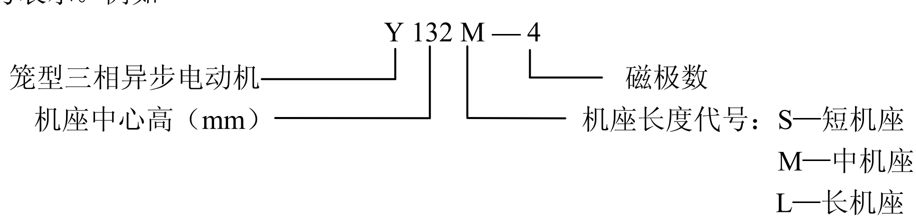
要正确使用电动机，必须要了解铭牌数据的含义。以 Y132M-4 型电动机为例，其名牌数据如表 5.2 所示。

表 5.2　三相异步电动机铭牌

三相异步电动机		
型号 Y132M-4	功率 7.5 kW	频率 50 Hz
电压 380 V	电流 15.4 A	接法 △
转速 1440 r/min	绝缘等级 B	工作方式 连续
效率 0.87	功率因数 0.85	
年 月 编号	XX 电机厂	

1．型号

为了适应不同用途和不同工作环境的需要，电动机制成不同的系列，每种系列用各种型号表示。例如



其他系列三相异步电动机的代号分别为：YR——绕线型异步电动机、YB——防爆型异步电动机、YQ——高启动转矩异步电动机。

2．接法

异步电动机的接法是指定子三相绕组的接法。一般鼠笼式电动机的接线盒中有 6 条引出线，标有 U_1、V_1、W_1，U_2、V_2、W_2，其中 U_1、U_2 是第一相绕组的两端；V_1、V_2，W_1、W_2 分别是第二、第三相绕组的两端。如果 U_1、V_1、W_1 分别为三相绕组的始端，则 U_2、V_2、W_2 是相应的末端。这 6 条引出线端在接电源之前，相互间必须正确连接，连接方法有星形连接和三角形连接两种。通常三相异步电动机自 3 kW 以下者，连接成星形；自 4 kW 以上者，连接成三角形。

3．额定电压 U_N

电动机额定运行时定子绕组的线电压。一般规定电动机的电压不应高于或低于额定值的 5%。

4．额定电流 I_N

电动机在额定运行时定子绕组的线电流。

5．额定功率 P_N 与额定效率 η

额定功率是指电动机额定运行时轴上输出的机械功率。额定效率是指额定运行时的效率。输出功率 P_N 与输入功率 P_1 的差值等于电动机本身的损耗功率，包括铜损、铁损及机械损耗等。以表 5.2 所示 Y132M-4 型电动机为例，其输入功率为

$$P_1 = \sqrt{3}U_N I_N \cos\varphi_N = \sqrt{3}\times 380\times 15.4\times 0.85 = 8.6\text{kW}$$

额定功率为

$$P_N = 7.5\text{kW}$$

效率为

$$\eta = \frac{P_N}{P_1} = \frac{P_N}{\sqrt{3}U_N I_N \cos\varphi_N} = \frac{7.5}{8.6}\times 100\% = 87\%$$

一般鼠笼式电动机在额定运行时的效率约为 72%～93%。

6．功率因数 $\cos\varphi$

因为电动机是电感性负载，定子相电流比相电压滞后一个 φ 角，$\cos\varphi$ 就是电动机的功率因数。三相异步电动机的功率因数较低，在额定负载时约为 0.7～0.9，而在轻载和空载时更低，空载时只有 0.2～0.3。

7．额定转速 n_N

额定状态下的转速即额定转速。由于生产机械对转速的要求不同，需要生产不同磁极数的异步电动机，因此有不同的转速等级。最常用的是四极电机（n_0=1500 r/min ）。

8．绝缘等级

绝缘等级是按电动机绕组所用的绝缘材料在使用时容许的极限温度来分级的。所谓极限温度，是指电机绝缘结构中最热点的最高容许温度。技术数据见表 5.3。

表 5.3　绝缘等级技术数据

绝缘等级	A	E	B	F	H
极限温度	105	120	130	155	180

9．工作方式

电动机的工作方式是指电动机运行的持续时间。一般分为连续、短时、断续三种，分别用字母 S_1、S_2、S_3 表示这三种工作方式。

此外，有的铭牌上还标有防护等级、噪声量等。

5.5.2　三相异步电动机的选择

在选用电动机时，一方面应根据机械设备在技术上的需要，正确选择电动机的种类、形式、容量等，以保证机械设备正常运转。另一方面，还要考虑经济方面的问题，使所选择的电动机在设备投资、节约电能、降低运行费用等方面符合要求。

一般说来，在技术方面要考虑以下三点：机械特性（硬特性还是软特性）、调速性能、启动性能。在经济方面主要考虑一次投资、运行费用（包括调速、制动时电能损耗及维修费用）。

1．功率的选择

电动机功率的选择非常重要。如果电动机的功率选得过大，虽然能保证其安全可靠地运行，但是不经济，不仅初期投资大，而且由于所谓“大马拉小车”现象，造成三相异步电动的功率因数和效率均降低，提高了运行费用，不符合节能要求；反之，若电动机的功率选小了，就不能保证电动机和生产机械正常工作，若保证充分发挥生产机械的能力，则电动机可能因长期过载提前损坏。

对于连续运行电动机功率的选择，要使电动机的额定功率等于或稍大于生产机械的功率，即满足

$$P_{\mathrm{N}} \geqslant \frac{P_{\mathrm{L}}}{\eta} \tag{5-21}$$

式中，P_{L} 为生产机械的负载功率；η 为电动机与生产机械之间的传动装置的效率。

有些生产机械的拖动电动机是属于短时工作制的，如电动阀门电动机，机床中的夹紧电动机，以及刀架快速移动电动机等。可以根据生产机械实际需要的功率选择合适的专为短时运行设计的电动机，其标准持续时间一般分为 10、30、60、90min 四个等级；如果没有这类合适的电动机，也可以选用连续运行的电动机。在实际选用连续工作制的电动机时，过载倍数要适宜。

2．结构形式的选择

由于生产机械工作环境各异，可针对不同工作环境的生产机械选择不同结构形式的电

动机。电动机的结构形式有：开启式、防护式、封闭式、防爆式等。

（1）开启式：适用于干燥清洁的环境里。这种电机价格便宜，散热好。

（2）防护式：这种电机一般可防滴防雨防溅及防止杂物从上面落入，散热条件也较好，适用于干燥、灰尘不多无腐蚀性爆炸性气体的场合。

（3）封闭式：适用于潮湿、易受风雨侵蚀、多腐蚀性灰尘的环境中。其中有安全密闭的电动机可以用于侵入水中的机械。

（4）防爆式：适用于有爆炸性气体的环境中。

3．电压和转速的选择

电动机电压等级的选择，主要根据电动机的类型、功率以及使用地点的电源电压决定。如Y系列的三相笼型异步电动机的额定电压均为三相 380V，只有这一个电压等级。电压的选择主要需要适应于电机使用场地的电源资源。

电动机的额定转速是根据生产机械要求的转速而选定。原则上使用电动机的转速尽量与生产机械转速一致，以便直接传动，简化传动机构，提高效率。

在选择电动机时，应全面考虑各方面的因素，才能对电动机做出合理、正确的选择。

5.6　三相异步电动机启动、制动与调速

5.6.1　三相异步电动机的启动

异步电动机接通电源后，转速由零逐渐升高，直至稳定运行，这个过程称为启动。

三相异步电动机的启动方式有以下几种：

1．直接启动

将电动机三相定子绕组直接接到具有额定电压的电源上的启动方式，称为直接启动。电机启动瞬间，由于转子电路中的感应电动势和电流都很大，将导致定子电流的增大。启动时的定子电流称为启动电流 I_{st}。直接启动时，其值可达到额定电流的 5～7 倍。这样大的启动电流一方面会造成电动机绕组因过热引起高温，从而加速绝缘老化；另一方面会使供电线路产生过大的电压降，不仅使电机本身启动转矩减小，还会影响接在同一电源上的其他负载的正常工作。

直接启动的主要优点是简单、方便、经济、启动时间短。一台电动机能否直接启动，取决于电源的容量及电动机频繁启动的程度。有的地区规定：用电单位如有独立的变压器，则在电动机启动频繁时，电动机容量小于变压器容量的 20%时允许直接启动；如果电动机不经常启动，它的容量小于变压器容量的 30%时允许直接启动。如果用电单位没有独立的变压器（与照明共用），电动机直接启动时所产生的电压降不应超过 5%。

2．降压启动

降压启动就是在启动时降低加在电动机定子绕组上的电压。降压启动的目的是限制启动电流。鼠笼式电动机的降压启动常用下面几种方法。

（1）星形-三角形（Y-△）换接启动。

如果电动机在工作时其定子绕组是连接成三角形的，那么在启动时可把它联成星形，

等到转速接近额定值时再换接成三角形。这样，在启动时定子每相绕组上的电压降到正常工作电压的$1/\sqrt{3}$。图 5.14 是定子绕组的两种连接法，Z_P为启动时每相绕组的等效阻抗。

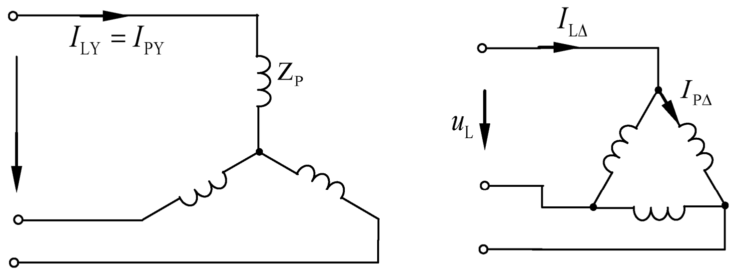


图 5.14　星型连接和三角形连接时的电路

当定子绕组连接成星形，即降压启动时

$$I_{LY}=I_{PY}=\frac{U_L/\sqrt{3}}{Z_P} \tag{5-22}$$

当定子绕组连接成三角形，即直接启动时

$$I_{L\Delta}=\sqrt{3}I_{P\Delta}=\sqrt{3}\frac{U_L}{Z_P} \tag{5-23}$$

比较上述两式，可得

$$\frac{I_{LY}}{I_{L\Delta}}=\frac{1}{3} \tag{5-24}$$

即Y-△换接启动时的电流为直接启动时的 1/3。

由于转矩和电压的平方成正比，而Y型连接的定子绕组的相电压是△连接时的$1/\sqrt{3}$，所以采用Y-△的启动转矩也减小到直接启动时的 1/3。因此，这种方法只适合于空载或轻载时启动。

Y-△换接启动可采用星三角启动器来实现。图 5.15 是一种星三角启动器的接线简图。在启动时，将手柄向右扳，使右边一排动触点与静触点相连，电动机就连成星形。等电动机接近额定转速时，将手柄往左扳，则使左边一排动触点与静触点相连，电动机换接成三角形。

星三角启动器具有体积小，成本低，寿命长，动作可靠等优点。目前 4～100kW 的异步电动机都已设计为 380V 三角形连接，因此星三角启动器得到了广泛的应用。

（2）自耦降压启动。

自耦降压启动是利用三相自耦变压器将电动机在启动过程中的端电压降低，其接线图如图 5.16 所示。启动时，先把开关 Q_2 扳到“启动”位置。当转速接近额定值时，将 Q_2 扳向“工作”位置，切除自耦变压器。

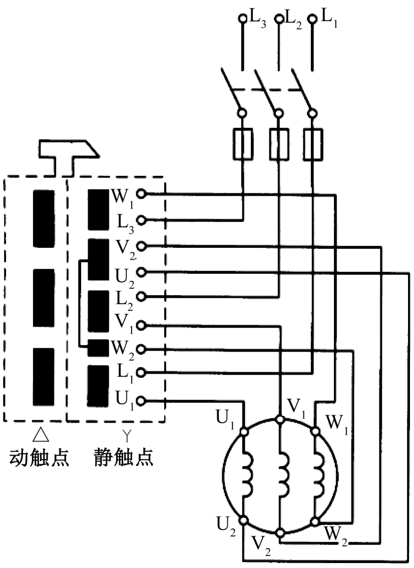


图 5.15　星三角启动器接线

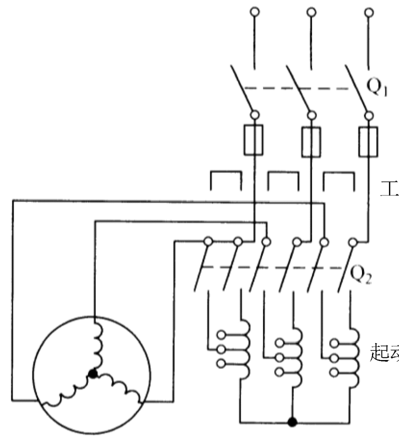


图 5.16　自耦降压启动器接线

自耦变压器备有抽头，以便得到不同的电压（例如为电源电压的 73%，64%，55%），根据对启动转矩的要求而选用。

采用自耦降压启动时，如果自耦变压器的降压比（即自耦启动电压与直接启动电压之比 U/U_N）为 K（$K<1$），则电网供给的启动电流和启动转矩都是直接启动的 K^2 倍。

自耦降压启动适用于容量较大的或正常运行时联成星形不能采用星三角启动器的鼠笼式异步电动机。

（3）软启动。

Y-△换接启动和自耦降压启动都属于有级减压启动，存在明显缺点，即启动过程中出现二次冲击电流。随着电力电子技术和计算机技术的发展，软启动器技术得以发展与推广，使电动机启动性能得以改善。

运用串接于电源与被控电机之间的软启动器，控制其内部晶闸管的导通角，使电机输入电压从零以预设函数关系逐渐上升，直至启动结束，赋予电机全电压，即为软启动。软启动实际就是一种降压启动方式，只不过降压值可以连续平滑调节。软启动与传统降压启动方式的不同之处在于无冲击电流、恒流启动、可自由地无级调整至最佳的启动电流等。在软启动过程中，电机启动转矩逐渐增加，转速也逐渐增加。软启动通常有限流启动和限压启动两种控制模式。除实现软启动功能外，软启动器还可以实现软停车、轻载节能等功能，具有较大的应用市场。

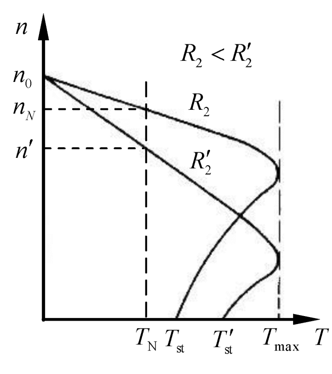


图 5.17　串电阻特性

3．转子串电阻启动

绕线式电动机的启动，只要在转子电路中接入大小适当的启动电阻，就可达到减小启

动电流的目的。绕线电机串电阻机械特性如图 5.17 所示。当转子电阻 R_2 增大时，电动机的转速降低。最大转矩 T_{max} 不变，特性变“软”，这种方法转子回路消耗功率较大，对节能不利。

绕线式电动机启动时的接线图如图 5.18 所示。对于绕线电动机来说，只要转子电路串联适当的电阻，就既可以减小启动电流，又可以提高启动转矩。所以它常用于要求启动转矩较大的生产机械上，例如卷扬机、锻压机、起重机及转炉等。

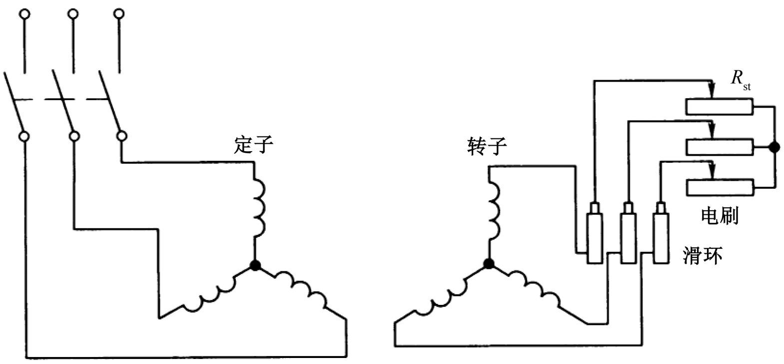


图 5.18　绕线式电动机启动时的接线

例 5.5 有一 Y225M-4 型三相异步电动机，其额定数据如表 5.4 所示。试求：

（1）额定电流 I_N；

（2）额定转差率 s_N；

（3）额定转矩 T_N、最大转矩 T_{max}、启动转矩 T_{st}；

（4）若负载转矩为 510.2N·m，试问在 $U=U_N$ 和 $U=0.9U_N$ 时，电动机能否启动？（5）采用 Y-Δ 换接启动时，求启动电流和启动转矩。又当负载为额定转矩的 80%和 50%时，电动机能否启动？

表 5.4　Y225M-4 型三相异步电动机额定数据

功率	转速	电压	效率	功率因数	I_{st}/I_N	T_{st}/T_N	T_{max}/T_N	接法
45kW	1480r/min	380V	92.3%	0.88	7.0	1.9	2.2	Δ

解：（1）电动机的额定功率 $P_N = P_1\eta = 45\text{kW}$，所以电源输入电动机的功率为

$$P_1 = \frac{P_N}{\eta} = \frac{45}{0.923} = 48.75\text{kW}$$

而 $P_1 = \sqrt{3}U_N I_N \cos\varphi_N$，所以

$$I_N = \frac{P_1}{\sqrt{3}\cdot U_N \cdot \cos\varphi_N} = \frac{48.75\times10^3}{\sqrt{3}\times380\times0.88} = 84.2\text{A}$$

（2）由已知 $n_N = 1480\text{r/min}$ 可知，电动机是四极的，即 p=2，n_0=1500 r/min。所以

$$s_N = \frac{n_0 - n}{n_0} = \frac{1500 - 1480}{1500} = 0.013$$

（3）$T_N = 9550\frac{P_N}{n_N} = 9550 \times \frac{45}{1480} = 290.4\text{N}\cdot\text{m}$

$$T_{max} = 2.2T_N = 2.2 \times 290.4 = 638.9\text{N}\cdot\text{m}$$

$$T_{st} = 1.9T_N = 1.9 \times 290.4 = 551.8\text{N}\cdot\text{m}$$

（4）在 $U = U_N$ 时，$T_{st} = 551.8\text{N}\cdot\text{m} > 510.2\text{N}\cdot\text{m}$，所以电动机能够启动。

在 $U = 0.9U_N$ 时，由于 $T'_{st} / T_{st} = (U / U_N)^2$，故 $T'_{st} = 0.9^2 \times 551.8 = 447\text{N}\cdot\text{m} < 510.2\text{N}\cdot\text{m}$，所以电动机不能启动。

（5）采用直接启动时的启动电流为

$$I_{st\Delta} = 7I_N = 7 \times 84.2 = 589.4\text{A}$$

采用 Y-△换接启动时，启动电流为

$$I_{stY} = \frac{1}{3}I_{st\Delta} = \frac{1}{3} \times 589.4 = 196.5\text{A}$$

启动转矩为

$$T_{stY} = \frac{1}{3}T_{st\Delta} = \frac{1}{3} \times 551.8 = 183.9\text{N}\cdot\text{m}$$

在 80%额定转矩时

$$80\%T_N = 290.4 \times 80\% = 232.3\text{N}\cdot\text{m} > T_{stY} = 183.9\text{N}\cdot\text{m}，$$

故电动机不能启动。

在 50%额定转矩时，有

$$50\%T_N = 290.4 \times 50\% = 145.2\text{N}\cdot\text{m} < T_{stY} = 183.9\text{N}\cdot\text{m}，$$

故电动机可以启动。

5.6.2　三相异步电动机的制动

运行中的电动机在切断电源后，由于惯性作用不能立即停下来。对于要求尽快、准确停车的机械，就需采取制动措施。所谓制动，就是给电动机一个与转动方向相反的转矩使它迅速停转（或限制其转速）。实现制动的方法一般有机械制动和电气制动两类。电气制动的实质是产生一个与转动方向相反的电磁转矩，迫使电机减速或停转。电气制动的特点是制动转矩大，操作控制方便。现代通用电机的电气制动方法有能耗制动、反接制动和回馈制动。

1．能耗制动

所谓能耗制动，即在电动机脱离三相交流电源之后，定子绕组任意两相加一个直流电压，利用转子感应电流与静止磁场的作用来达到制动。运行中的电动机从交流电源上切除

后，转子因惯性仍继续旋转。如将定子绕组立即接通直流电源，直流电流会在定子内产生一个静止的直流磁场。转子因惯性而继续旋转切割该恒定磁场，在转子导体中产生感应电动势和感应电流。转子的载流导体与恒定磁场相互作用而产生一个与转子转向相反的制动电磁转矩，使电动机迅速减速，最后停止转动。

能耗制动是利用转子转动的能量切割磁通而产生制动转矩的，实质是将转子的动能消耗在转子回路中（转子铜耗和铁耗），故称为能耗制动。能耗制动的优点是制动力强、制动平稳、无大的冲击。应用能耗制动能使生产机械准确停车，被广泛用于机床、矿井提升和起重机运输等生产机械。能耗制动也存在需要直流电源、转速较低时制动力矩小等缺点。

2．反接制动

若将正在运行的三相异步电动机的定子绕组的三根供电线中的任意两相对调，旋转磁场立即反转，由原来与转子转向相同变为与转子转向相反。此时转子绕组切割磁场的方向与电动机状态相反，产生的电磁转矩起制动作用，使电机转速下降。当转速降至接近于零时，必须立即切断电源，以避免电动机反转。

反接制动的优点是制动力强、停转迅速、无需直流电源；缺点是制动过程冲击大，电能消耗多，准确度较差。

3．回馈制动

回馈制动是在外加转矩的作用下，使转子转速超过同步转速，电磁转矩改变方向成为制动转矩的制动方法。当外力的作用使得电动机转子转速 n 超过旋转磁场转速 n_0 时，电动机进入发电状态，向电网反馈能量，转子所受的力矩迫使转子转速下降，起到制动作用。例如起重机快速下放物体时，重物拖动转子，使其转速 n 超过 n_0。这时转子绕组切割定子旋转磁场的方向与原电动状态相反，电磁转矩的方向由与转子转向相同变为相反，转子转动受到制动，使重物等速下降。这种制动方式下，电动机将重物势能转换为电能回馈电网。

回馈制动将负载的机械能转换为电能反送电网，具有很好的经济性；但这种制动方法应用范围不广。

5.6.3 三相异步电动机的调速

调速是指为了满足生产过程的需要，人为调节电动机的转速。例如各种切削机床的主轴运动随着工件与刀具的材料、工件直径、加工工艺的要求及走刀量大小等的不同，要求有不同的转速，以获得最高的生产效率和保证加工质量。如对电机实行调速控制，则可以大大简化机械变速机构，提高加工精度，节省过程能耗。

异步电动机的转速可表示为

$$n=(1-s)n_0=(1-s)\frac{60f_1}{p} \tag{5-25}$$

因此，改变电源频率 f_1、改变极对数 p、调节转差率 s 均可达到调速的目的。

1．变极调速

通过变换异步电动机绕组极数从而改变同步转速进行调速的方式称为变极调速。异步电动机的磁极对数由定子绕组的布置和连接方法决定。因此，可以采用改变每相绕组的连

接方法来改变磁极对数。

由转速公式（5-25）可知，如果极对数 p 减小一半，则旋转磁场的转速 n_0 便提高一倍，转子转速 n 差不多也提高一倍，因此改变极对数可以得到不同的转速，但其转速只能按阶跃方式变化，不能连续变化。

变极调速方法的优点是操作设备简单、运行可靠。缺点是转速只能成倍变化，属于有极调速。变极调速一般只适用于不要求平滑调速的场合。

2．变频调速

异步电动机的转速正比于电源的频率 f_1，若连续调节电动机供电电源的频率，则可连续改变电动机的转速。

变频调速是通过改变电动机定子电源的频率，从而改变其同步转速的调速方法。近十几年来，变频调速技术随着电力电子技术、计算机技术、自动控制技术的进步而迅速发展。变频调速具有调速平滑、调速范围宽、效率高特性好、结构简单、机械特性硬、保护功能齐全、运行平稳、安全可靠、在生产过程中能获得最佳速度参数等优点，是其他调速方法无法比拟的理想调速方式，现已广泛应用于国民经济各领域。

变频调速有两种基本控制方式：恒转矩控制和恒功率控制。

在进行变频调速时，为使电动机的转矩特性能较好地满足机械负载的要求，希望在调节电源频率的同时，能使加在电动机上的电压也随之改变。在 $f_1<f_{1N}$，即定子绕组的电源频率由基频向下调节时，定子电压也同比例调节，即保持 U_1/f_1 的比值近于不变。这种控制方式可以使调速时的转矩保持恒定。这种恒转矩控制方式下的调速称为恒转矩调速。

在 $f_1>f_{1N}$，即频率由基频向上调节时，由于电动机受到额定电压的限制，频率可以继续上调使转速升高，但电压不能超过其额定值继续升高，最多只能保持在额定电压。这时磁通和电磁转矩都将减小。在这种控制方式下，转速增大，转矩减小，但转速与转矩的乘积即功率近于不变。这种恒功率控制方式下的调速称为恒功率调速。

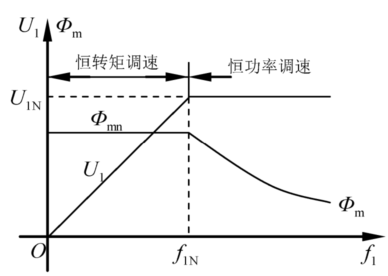


图 5.19　异步电动机的变频调速

异步电动机变频调速控制特性如图 5.19 所示。

变频调速是一种性能最好的调速方式，但需要专门的变频装置，即通常所说的变频器。变频器将电网供给的恒压恒频交流电变换成电压、频率可调的交流电。按照主电路工作方式分类，可以分为电压型变频器和电流型变频器；按照开关方式分类，可以分为 PAM 控制变频器、PWM 控制变频器和高载频 PWM 控制变频器；按照工作原理分类，可以分为 V/f 控制变频器、转差频率控制变频器和矢量控制变频器等；按照用途分类，可以分为通用变频器、高性能专用变频器、高频变频器、单相变频器和三相变频器等。

在变频调速中使用最多的变频器是交—直—交变频器，如图 5.20 所示，由整流器、滤波系统和逆变器三部分组成。在其工作时，首先将三相交流电经桥式整流电路整流为直流电，脉动的直流电压经平滑滤波后在微处理器的调控下，通过逆变器将直流电再逆变为电压和频率可调的三相交流电，输出到需要调速的电动机上。通过变频器可任意改变电源输出频率，从而任意调节电机转速，实现平滑的无级调速。

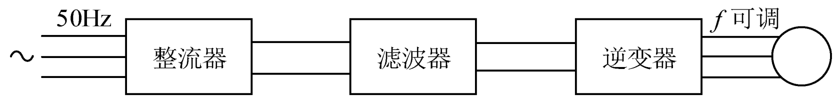


图 5.20　交—直—交变频器

3．变转差率调速

（1）调压调速。

调压调速是异步电机调速系统中比较简便的一种。当异步电机的等效电路参数不变时，在相同的转速下，电磁转矩与定子电压的平方成正比。因此，改变定子外加电压就可以改变机械特性的函数关系，从而改变电机在一定输出转矩下的转速。调压调速目前主要采用晶闸管交流调压器变压调速，是通过调整晶闸管的触发角来改变异步电动机端电压进行调速的一种方式。调压调速过程中，转差功率损耗在转子里或其外接电阻上，效率较低；而且调速范围有限，一般仅用于小容量电动机。

（2）转子串电阻调速。

转子串电阻调速只适用于绕线电机，是在绕线转子异步电动机转子外电路上接入可变电阻，通过对可变电阻的调节，改变电动机机械特性斜率以实现调速的一种方式。这种调速方式下，电机转速可以按阶跃方式变化，即实现有级调速。转子串电阻调速方法结构简单、价格便宜，但转差功率损耗在电阻上，效率随转差率增加等比下降，故这种方法目前一般不被采用。

（3）串级调速。

绕线转子异步电动机的转子绕组能通过集电环与外部电气设备相连接，可在其转子侧引入控制变量如附加电动势进行调速。

电气串级调速的基本原理是在绕线转子异步电动机转子侧通过二极管或晶闸管整流桥，将转差频率交流电变为直流电，再经可控逆变器获得可调的直流电压作为调速所需的附加直流电动势，将转差功率变换为机械能加以利用或使其反馈回电源而进行调速的一种方式。这是一种节能型调速方式，在大功率风机、泵类等传动电动机上得到了应用。

5.7　三相异步电动机的继电–接触器控制

在工农业生产中，几乎所有的生产机械都是用电动机来拖动的，这种拖动方式称为电力拖动。电力拖动有很多优点，它能实现生产过程的自动控制和远距离控制，使生产机械的传动机构大为简化，减少了传动损耗。

实现电动机控制和保护的最广泛、最基本的方式是继电器-接触器的控制方式。这种控制方式由多种有触点的低压电器根据不同的控制要求以及生产机械对电气控制电路的要求连接而成，能实现对电力拖动系统的启动、反向、制动、调速等运行过程的控制，也能对电力拖动系统进行有效的电气保护，满足生产工艺的要求与实现生产过程自动化。

5.7.1　常用低压电器

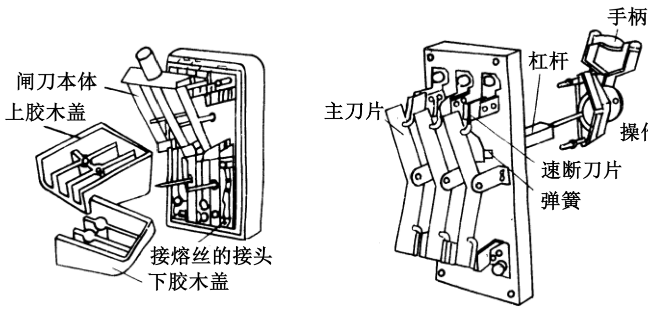
低压电器是电气控制中的基本组成元件，控制系统的优劣和低压电器的性能有直接的关系。低压电器是指工作在交流电压 1200V 及以下，或直流电压 1500V 及以下电路中的电

器。低压电器种类繁多，功能各样，构造各异，用途广泛，工作原理各不相同。通常按用途、执行机理、动作方式等的不同对低压电器进行分类。按动作方式分类，低压电器可分为手动电器和自动电器；按用途分类，低压电器可分为控制电器和保护电器；按执行机理分类，低压电器可分为有触点电器和无触点电器。

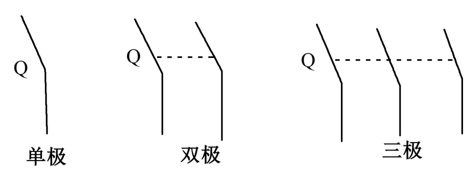
常用低压电器有熔断器、热继电器、中间继电器、接触器、开关、按钮、自动空气开关等。

1．闸刀开关

闸刀开关又称刀开关或隔离开关，它是手控电器中最简单而使用又较广泛的一种低压电器，用来接通和切断电源。刀开关主要由刀片（动触头）、刀夹（静触头）、绝缘底板和操作手柄等部分组成，如图 5.21 所示。



（a）胶盖瓷底闸刀开关　　（b）用连杆操作的刀开关



（c）闸刀开关表示符号

图 5.21　闸刀开关

有灭弧罩和断弧刀片的闸刀开关可以带全负荷拉闸，但操作次数不能过于频繁；而对于没有灭弧装置的闸刀开关，则不允许切断额定负荷，这种闸刀开关仅起隔离开关的作用，通常在检修时拉开闸刀开关，使闸刀开关以下部分与电源隔离，以保证检修人员的人身安全。

闸刀开关有单极、双极和三极三种，而上述三种又有单向单投和双向双投之分，前者用得多些。

低压闸刀开关的电压等级通常有 250V 和 500V 两种，而其额定电流为 10A～1500A。

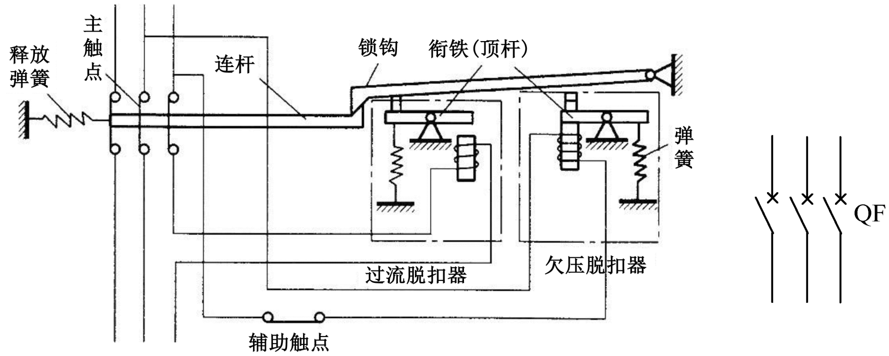
闸刀开关种类繁多，适于使用场合各异，在选用时除了要考虑用途、使用场合等方面的问题，选用相应的型号，更主要的还要选择其额定电流等级，即

$$I_N \geqslant I_L \tag{5-26}$$

式中，I_N 为闸刀开关的额定电流；I_L 为负荷电流的有效值。

2．自动空气断路器

自动空气断路器也叫自动开关，是常用的一种低压保护电器，可实现短路、过载和失压保护。它的结构形式很多，一般结构原理如图 5.22（a）所示。当操作手柄扳到合闸位置时，触点连杆被锁钩锁住，使触点保持闭合状态。自动开关的保护装置由过流脱扣器和欠压脱扣器组成。过流脱扣器起短路及过载保护作用，欠压脱扣器起欠压保护作用。在开关合闸时，手柄通过机械联动将辅助触点闭合，使欠压脱扣器的电磁铁线圈通电，衔铁吸合。当电路失压或电压过低时，电磁铁吸力消失或不足，在弹簧力的作用下，顶杆将锁钩顶开，主触点在释放弹簧拉力作用下迅速断开而切断主电路。当电源恢复正常时，必须重新合闸才能工作，实现了欠压保护。图 5.22（b）是自动开关的图形符号。



（a）原理图　　（b）图形符号

图 5.22　自动开关

自动开关种类繁多，需根据保护电路的保护特性选择其类型，根据被保护电路的电压和电流选择其额定电压和额定电流，根据被保护电路所要求的保护方式选择脱扣器种类。

3．熔断器

熔断器是一种简便有效的短路保护电器。它串接在被保护电路中，当电路发生短路故障时，自动切断电路，从而起到保护线路及电气设备的作用。

熔断器主要由熔体和外壳及支座等组成。在使用时，熔体串联在被保护对象的线路中，其中通过的是被保护对象的电流，当被保护对象内部或外部出现短路故障时，则数值很大的短路电流将通过熔体，则熔体因过热而立即熔断，从而使被保护对象断电。通常熔体是由高电阻率、低熔点的合金材料制成。

熔断器的种类、型号及规格很多，常用的熔断器有管式、插入式、螺旋式等，如图 5.23 所示，其中图 5.23（d）为熔断器的图形符号。

对熔断器的基本要求是：①可靠性，能可靠切断短路和过载时的电流；②选择性，能有效躲过启动电流；③配合性，能与各级熔断丝即自动开关配合。选择熔断器时，熔体的额定电流必须等于或稍大于线路上持续工作的最大电流，才能对电路起短路保护作用，而不会在短时过载时熔断。

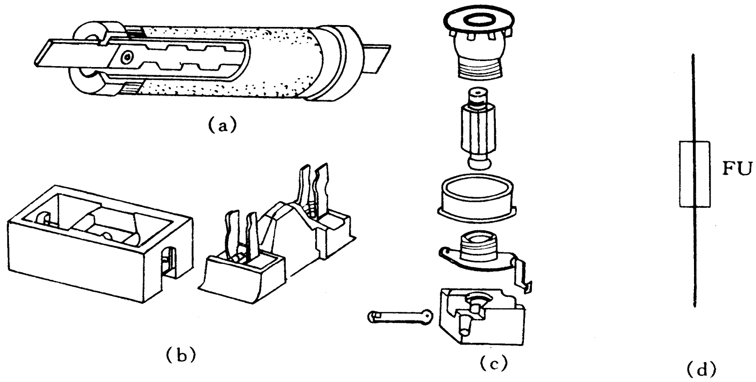


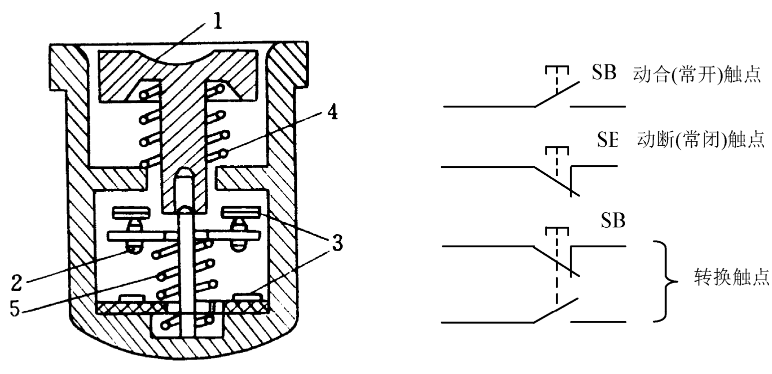
图 5.23　几种常用的熔断器

4．按钮

按钮是一种简单的手动开关电器元件，可以用来接通或断开电路。通常由它发出的开关信号去驱动接触器类电磁开关，从而达到控制电动机或其他电器设备运行的目的。

通常按钮是自复位式，也有自锁式。图 5.24 为按钮的剖面图和图形符号。图中 2 为动触点，3 为静触点。将按钮 1 用手指按下时，下面一对原来断开的触点被接通，可以接通某一控制回路，而上面一对原来闭合的触点则断开，可以断开某一控制回路。当松手时，靠弹簧的作用立即恢复到原来状态。原来接通的一对触点，称为常闭触点（也称动断触点）；原来断开的触点，称为常开触点（也称动合触点）。当手按动按钮时，其常闭触点（动断触点）断开；常开触点（动合触点）闭合，这种状态称为“动作状态”。当松手时，在复位弹簧的作用下，其常闭触点（动断触点）闭合，常开触点（动合触点）断开，这种状态称为“释放状态”，也称“常态”。

按钮的选用可根据实际需要查阅有关产品样本。



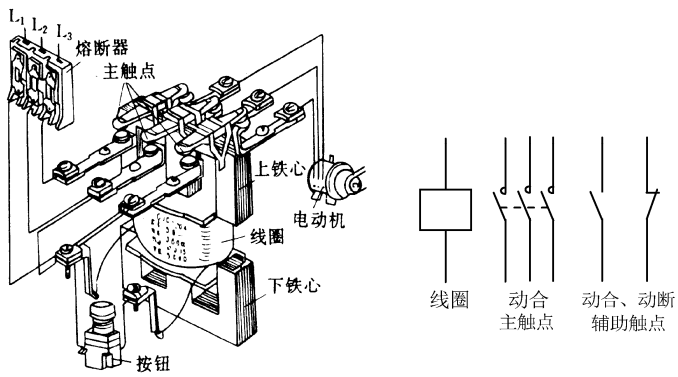
(a) 剖面图　　(b) 图形符号

1—按钮；2—动触点；3—静触点；4，5—弹簧

图 5.24　按钮的结构剖面图与图形符号

5．交流接触器

交流接触器是一种用电磁铁操作的开关，属于自动控制电器，主要用于接通或断开电动机或其他电气设备主电路。交流接触器的结构和图形符号如图 5.25 所示。



（a）结构图　（b）图形符号

图 5.25　交流接触器

交流接触器主要由触点和电磁铁构成。其中触点可分为主触点和辅助触点两类，通常主触点共有三对常开（动合）触点接在主电路中，控制电动机等额定负载。主触点的额定电流就是交流接触器的额定电流，通常有 10A、20A、40A、75A、100A、150A、250A、400A、600A 等。此外，还有若干对常开（动合）和常闭（动断）触点，其额定电流一般为 5A 或 5A 以下，接在控制电路或信号指示电路中，通过的是几安的控制或信号电流，这种触点称为辅助触点。

构成交流接触器的另一个主要组成部分是电磁铁，其中包括固定不动部分的铁心、可以上下运动的衔铁、励磁线圈和对衔铁具有向上作用力的释放弹簧。

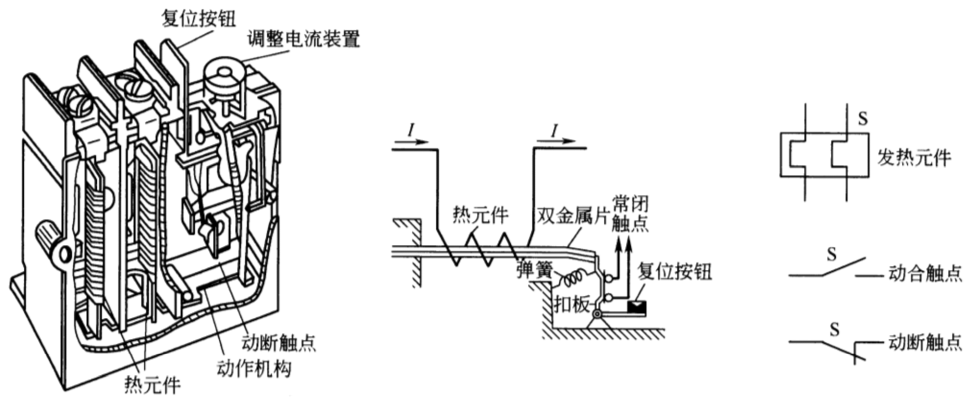
此外，还有灭弧装置，如灭弧罩。因为接触器的主触点通过较大的电流，在断点处产生电弧，如果不能及时灭掉，将会烧坏主触点，甚至会将动静触点熔焊在一起，这是不允许的。主触点的结构形式和灭弧罩可以起到促进灭弧的作用。

交流接触器的励磁线圈电压具有不同的额定值，有 380V、220V、127V、110V 等，当将线圈加上额定电压时，则在由铁心、空气隙和衔铁构成的磁路中产生足够大的磁通，从而使铁心产生足够大的对衔铁的电磁吸力，并克服释放弹簧向上的作用力，将衔铁吸合，由于所有动触点（包括三对常开主触点的动触点、若干对常开或常闭辅助触点的动触点）均通过绝缘的连接架与衔铁固定在一起，故当衔铁被铁心吸合后，所有动触点也随之向下运动，三对常开主触点的动触点将分别对应接通其三对静触头，与此同时，所有的常开辅助触点接通，常闭触点断开。当线圈断电时，铁心对衔铁的吸力消失，衔铁在释放弹簧的向上作用力的作用下而复位，所有的动触点也与此同时复位，称接触器的这种状态为释放状态，当接触器释放时，所有的常开（动合）触点断开，所有的常闭（动断）触点闭合。

交流接触器的种类、型号及规格繁多，选用时主要应注意：①交流接触器的额定电流 I_{KN} 要不小于被控制电器的额定电流 I_{MN}，即应使 $I_{KN} \geqslant I_{MN}$；②根据控制电源的电压等级选择接触器线圈的额定电压；③根据实际需要选择接触器辅助触点的类型和数量。

6．热继电器

热继电器是一种保护电器，它主要被用于电动机的过载保护。热继电器是利用电流热效应原理工作的电器。其基本结构及图形符号如图 5.26 所示。



（a）外形图　　　　（b）结构原理图　　　　（c）图形符号

图 5.26　热继电器结构原理示意图

热继电器主要由发热元件、双金属片和触点三部分组成。热元件是一段电阻不大的电阻丝，串接在主电路中。双金属片由两种具有不同膨胀系数的金属辗压而成。图中，下层金属的膨胀系数大，上层的膨胀系数小。当主电路中电流超过容许值而使双金属片受热时，它便向上弯曲而脱扣，扣板在弹簧的拉力下将常闭触点断开。

由于热惯性，热继电器不能作短路保护。因为发生短路事故时，我们要求电路立即断开，而热继电器是不能立即动作的。但是这个热惯性也是合乎我们要求的，在电动机启动或短时过载时，热继电器不会动作，这可避免电动机的不必要停车。

如果要热继电器复位，则按下复位按钮即可。

热继电器的主要技术数据是整定电流。整定电流是指长期通过发热元件而不致使热继电器动作的最大电流。当发热元件中通过的电流超过整定电流的 20%时，热继电器应当在 20min 内动作。JR10-10 型热继电器的整定电流从 0.25A 到 10A，热元件有 17 个规格。JR0-40 型的整定电流从 0.6A 到 40A，有 9 种规格。选用和整定热继电器时，一定要使整定电流与电动机的额定电流一致。

5.7.2　三相异步电动机的继电-接触器控制电路

1．三相异步电动机的控制原理

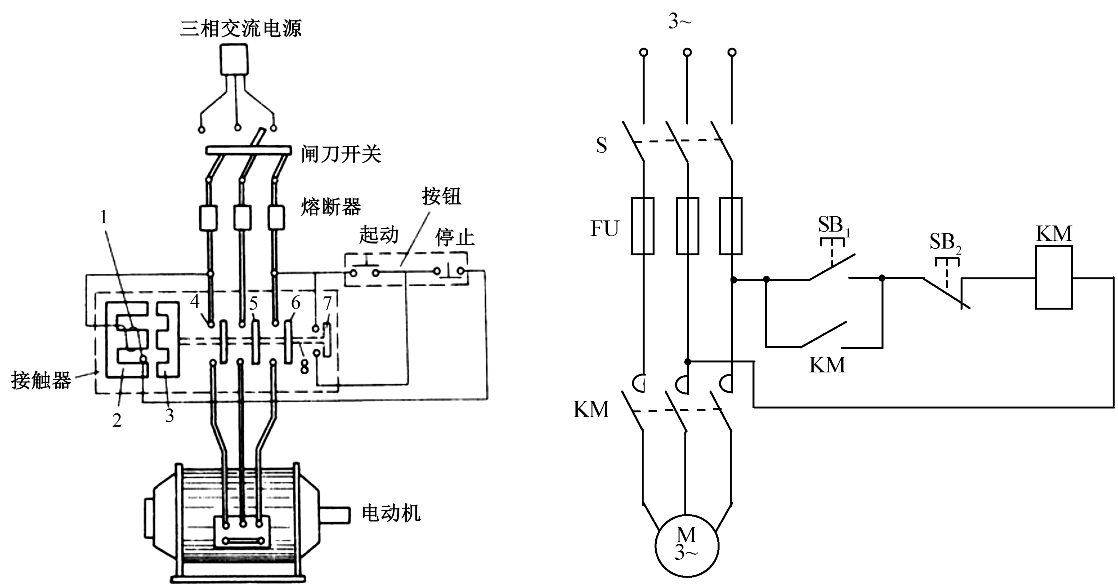
通过开关、按钮、继电器、接触器等电器触点的接通或关断来实现的各种控制称为继电-接触器控制。典型的控制环节有点动控制、正反转控制等。电动机在使用过程中由于各种原因可能会出现一些异常情况，因此必须采取保护措施。常用的保护环节有短路保护、过载保护、欠压保护等。

图 5.27 所示是三相异步电动机最简单的控制电路的结构示意图及其电气原理图，该电路的控制功能是实现电动机全压启动、运转和随时停止。

交流接触器的三对常开主触点 4、5、6 的下端（负荷端）分别与电动机的三相定子绕组相接，上端（电源端）通过熔断器、刀开关与三相电源相接。接触器的线圈 1 的上端接在三相电源的左边一相上，该线圈的下端通过一个常闭按钮、一个常开按钮接在三相电源的右边一相上，接触器的常开辅助触点 7 与“启动”（常开）按钮并联。由闸刀开关、熔断器、交流接触器主触点和电动机构成的电路称为电动机控制电路的“主回路”，该回路中的

电流为电动机的线电流。由接触器线圈、“启动”、“停止”按钮和接触器常开辅助触点所构成的电路称为“控制回路”，该电路中的电流为线圈电流。

异步电动机简单控制电路的基本工作原理如下：合上闸刀开关，主回路闸刀开关以下与接触器主触点以上接通三相电源，按“启动”按钮，其常开触点闭合，接触器线圈通过“停止”按钮的常闭触点、“启动”按钮已闭合的常开触点接到三相电源的线电压上，该接触器“动作”，三对常开主触点闭合，电动机三相定子绕组接通三相电源启动运转。接触器的常开辅助触点 7 闭合将与之并联的启动按钮短接，松手后启动按钮复位，常开触点断开，但由于辅助触点 7 已闭合，故其线圈仍被接通电源线电压，接触器仍保持动作状态。接触器的常开辅助触点 7 的这一作用，称为“自锁”，该环节为“自锁环节”。若使电动机停止运转，按“停止”按钮，其常闭触点断开，接触器线圈断电，于是接触器释放，其三对常开主触点断开，异步电动机定子三相绕组断电停止，其常开辅助触点 7 也断开，为下次动作做准备。



（a）结构示意图　　（b）电气原理图

1—线圈；2—铁心；3—衔铁；4,5,6—主触点；7—辅助触点；8—绝缘杆

图 5.27　三相异步电动机最简单的控制电路

该控制电路对电动机的保护功能为短路保护（熔断器），失压或欠压保护。所谓失压保护，是指电动机运行期间线路停电，则接触器释放、电动机停转，当线路恢复供电时，电动机不会自行重新启动。所谓欠压保护，是指当线路电压跌落很大时，由于铁心对衔铁的吸力与线圈端电压的平方成正比，故当线圈端电压降低时，铁心对衔铁的吸力急剧减小，当小于释放弹簧的反作用力时，接触器释放。

2．三相异步电动机的继电-接触器控制电路

三相异步电动机的基本控制电路包括两种，其一为对单台电动机的不可逆（即不反转）

控制电路，其控制功能为全压启动、运转、停止，其保护功能有短路、过载、失压或欠压保护。其二是对单台电动机的可逆控制（即可正反转）电路，其控制功能有全压启动、正转运行、反转运行、停止，其保护功能无论正转、反转都具有短路、过载、失压或欠压保护作用。在实际应用中，无论遇到如何复杂的电动机控制电路，其主要部分几乎都是这两种基本控制电路。

（1）不可逆控制的基本电路。

电动机不可逆控制线路常用于只需要单方向运转的小功率电动机的控制，例如小型通风机、水泵以及皮带运输机等机械设备。图 5.28 为单台异步电动机不可逆控制的电气原理图。这是一种最常用、最简单的控制线路，能实现对电动机的启动、停止的自动控制等。图中左边为主回路，由隔离开关 S、熔断器 FU、接触器 KM 的常开主触点、热继电器 K 的热元件和电动机 M 组成。右边为控制回路，由启动按钮 SB_2、停止按钮 SB_1、接触器 KM 线圈和常开辅助触点、热继电器 K 的常闭触头构成。该电路的工作原理与图 5.27 中的电路基本相同。

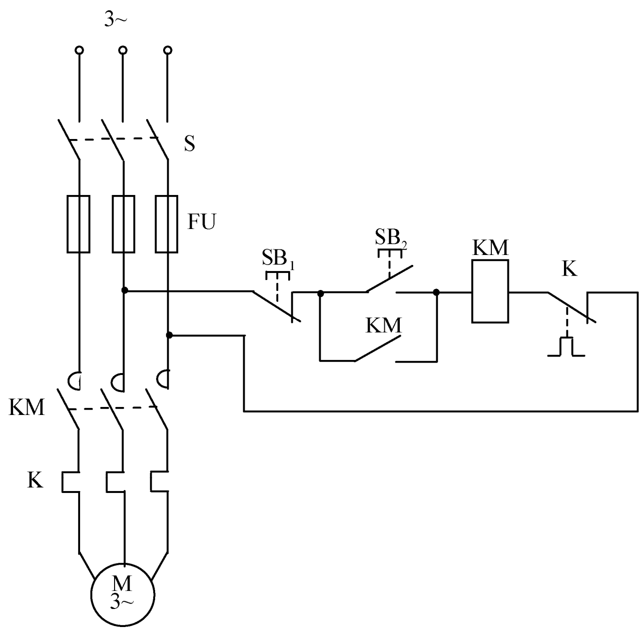


图 5.28　单台三相异步电动机不可逆控制电气原理图

（2）可逆控制的基本电路。

在生产过程中，很多生产机械的运行部件都需要正反两个方向运动，因此对拖动机械装置的电动机需要进行正反转控制。通过改变电动机三相电源的相序，即用两个接触器的主触点对调电动机定子绕组上三相电源的任意两根接线来改变电动机的转向，可以实现电动机的正反转。图 5.29 为单台三相笼式异步电动机可逆控制电路的电气原理图，接触器 KM_1 的三对主触点把三相电源和电动机的定子绕组按顺相序 L_1、L_2、L_3 连接，而 KM_2 的三对主触点把三相电源和电动机的定子绕组按反相序 L_3、L_2、L_1 连接，使电动机可以实现正反两个方向上的运行。

从该电路主回路的分析不难看出，若 KM_1 与 KM_2 同时动作，将造成 L_1 相与 L_3 相间的短路事故，这是不容许的。因此，对正反转可逆控制线路最基本的设计要求是：必须保证正反转两个接触器不能同时工作，以防止电源短路，即进行互锁控制，使同一时间里只允许两个接触器中的一个接触器工作。为此，设计控制回路时，在接触器 KM_1、KM_2 的线圈支路中分别串接了对方的一个常闭辅助触点。工作时，按下正转按钮 SB_1 时，正转接触器 KM_1 线圈通电动作，其三对常开主触点闭合，电动机通电正转，其常开辅助触点 KM_1 闭合自锁；而串联在反转接触器 KM_2 线圈的电路回路中的常闭辅助触点 KM_1 断开，切断了反转接触器 KM_2 线圈的通路，保证当电动机在正转运行时，反转接触器 KM_2 的线圈无论如何也不能通电动作,此时按下反转启动按钮 SB_2 将无效。按下停止按钮 SB_3，接触器 KM_1 线圈断电，KM_1 常闭触点复位闭合，再按下反转启动按钮 SB_2，反转接触器 KM_2 线圈通电，其常开触点闭合，电动机反相序接至电源，实现电动机的反转；同时，串接在 KM_1 线圈支路中的 KM_2 常闭触点断开，封锁了接触器 KM_1 使其无法通电。

这样的控制线路可以保证接触器 KM_1、KM_2 不会同时通电，这种作用称为互锁，这两个接触器的常闭触点称为互锁触点，这种通过接触器常闭触点实现互锁的控制方式称为接触器互锁，又称为电气互锁。

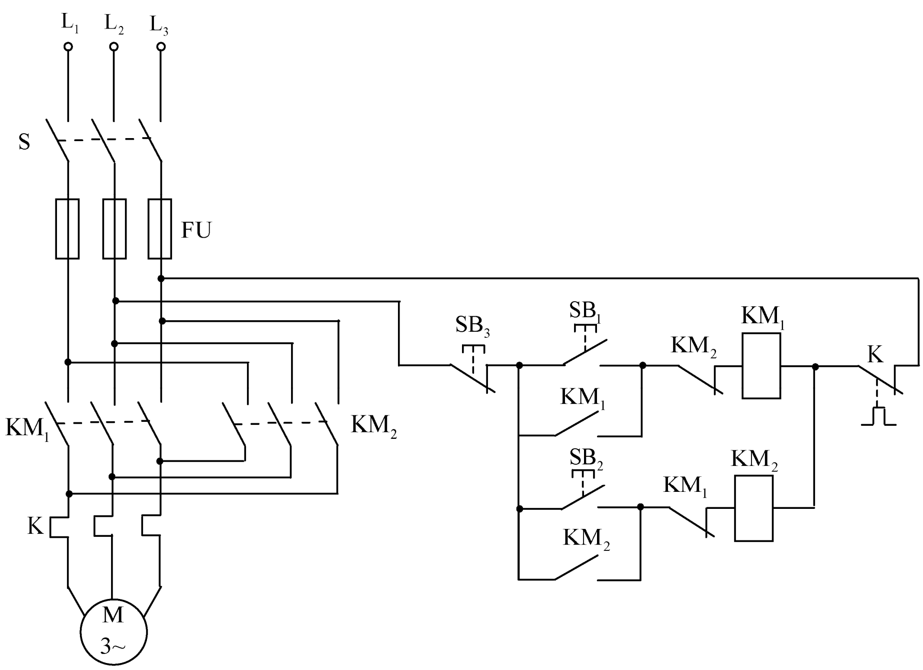


图 5.29　单台三相笼式异步电动机可逆控制电路的电气原理图

复合按钮也具有互锁功能，如图 5.30 所示电路是在图 5.29 所示电路的基础上，将正转启动按钮 SB_1 和反转启动按钮 SB_2 的常闭触点串接在对方线圈的支路中，构成互相制约的关系，称为机械互锁。这种互锁能保证一个接触器断电释放后，另一个接触器才能通电动作，避免因误操作造成电源短路。采用 KM_1、KM_2 的常闭辅助触点实现控制电路的电气连锁，用 SB_1、SB_2 的常闭触点实现控制电路的机械连锁，即双重连锁。

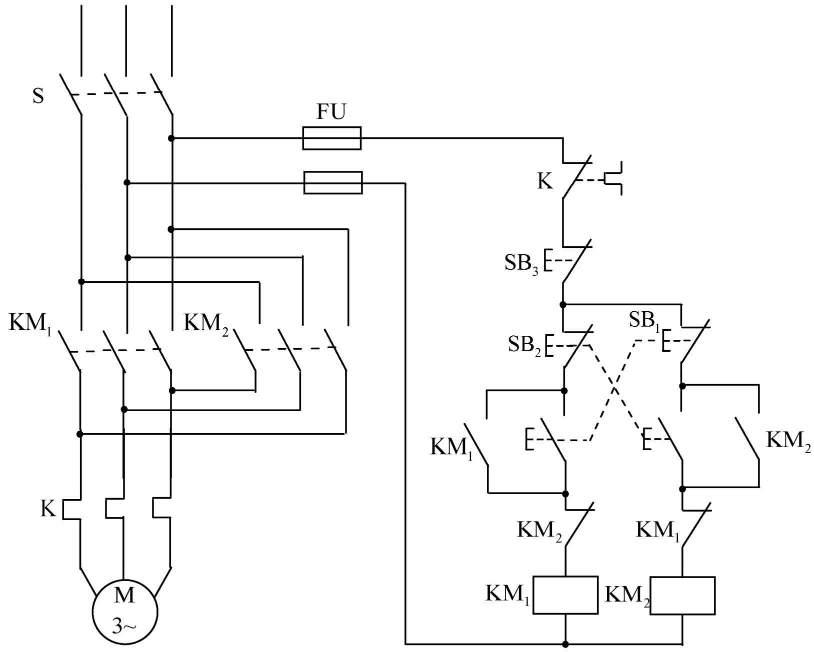


图 5.30　双重互锁的电动机正反转控制线路

按下正转按钮 SB_1，接触器 KM_1 线圈得电，其主触点闭合，电动机正转；同时 KM_1 的自锁常开触点闭合、互锁常闭触点断开。按下反转按钮 SB_2，接触器 KM_1 线圈断电，KM_1 的互锁触点闭合，接触器 KM_2 线圈通电，KM_2 主触点闭合，电动机反转；同时 KM_2 的自锁常开触点闭合、互锁常闭触点断开。

注意：机械互锁与电气互锁不能互相代替。只有电气互锁的可逆控制系统在正转过程中要求反转时，必须先按下停止按钮使正转线圈断电，才能按反转按钮使电动机反转，这给操作带来了不方便。复式按钮构成的机械互锁可以解决这个操作问题。而当主电路中正转接触器的触点发生熔焊（即静触点和动触点烧蚀在一起）现象时，即使接触器线圈断电，触点也不能复位，机械互锁不能动作，此时只能靠电气互锁才能避免反转接触器通电而造成的电源短路。按钮与接触器的双重互锁使电路更安全可靠。

5.8　应 用 举 例

5.8.1　几种电动机控制应用电路

1．既能点动又能连续工作的控制电路

在自动控制系统中，除了需要对电动机进行正常连续控制外，有时还需要对其进行点动控制。图 5.31 所示电路为既能点动又能正常控制的电路。图中，按钮 SB_1 为停止按钮，按钮 SB_2 为正常操作按钮，按钮 SB_3 为点动控制按钮。按下 SB_3 后，接触器 KM 线圈通电，三对常开主触点闭合，电动机三相定子绕组接通三相电源启动运转；松开 SB_3，KM 线圈断电，电动机停止工作，此为电动控制。按下 SB_2，中间继电器 KA 线圈通电，此时分别与按钮 SB_2 和 SB_3 并联的中间继电器 KA 的常开触点闭合，则 KM 线圈通电，电动机工作，

同时与 SB_2 按钮并联的 KA 常开触点闭合形成自锁，松开 SB_2 后，KM 线圈仍然继续通电。只有在按下 SB_1 后，电动机才会断电停止工作。

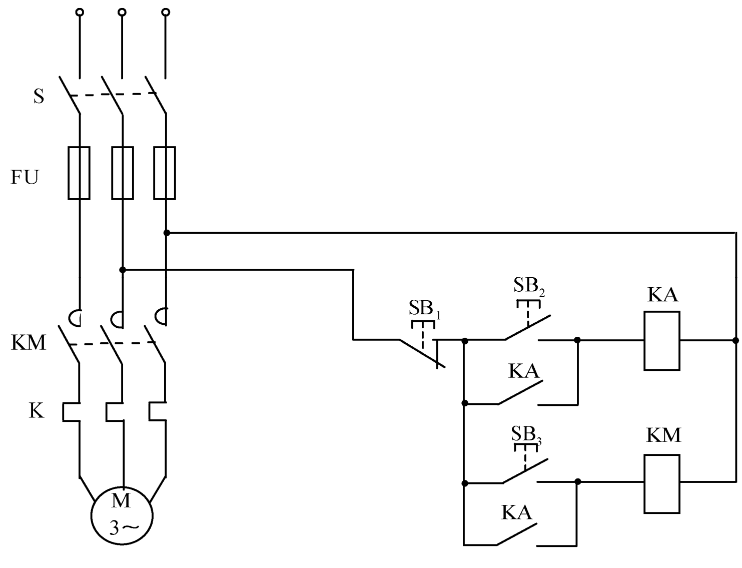


图 5.31　点动与连续控制线路

2．两台电动机的顺序联锁控制电路

在实际生产中，有些机械装置通常需要多台电动机拖动，而有些电动机之间往往存在着一定的顺序关系。例如，对于一些大型机床，必须先启动油泵电动机，使其为主轴提供循环润滑油，之后才能将主轴电动机启动。要实现这一目的，应采用“联锁”控制环节。主轴电动机和油泵电动机启动顺序联锁控制的电路如图 5.32 所示。

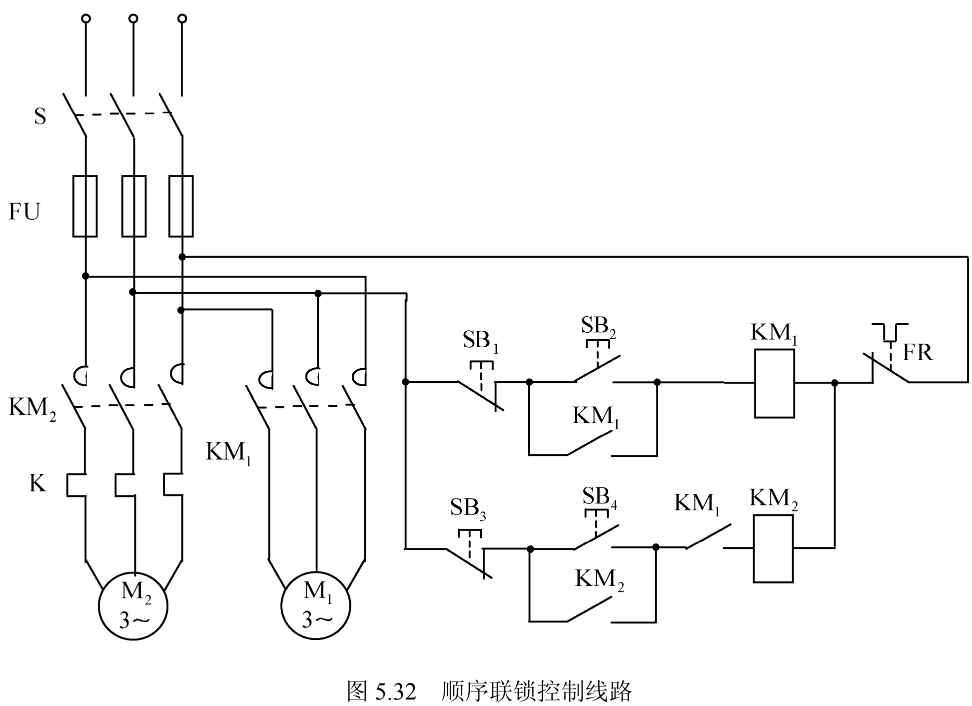


图 5.32　顺序联锁控制线路

在图 5.32 中，用接触器 KM_1 来控制油泵电动机 M_1，用接触器 KM_2 来控制主轴电动机 M_2。将 KM_1 的一个常开触点串联在主轴电动机控制电路中，只有当 KM_1 线圈通电，油泵电动机启动，常开触点 KM_1 闭合，控制主轴电动机的接触器 KM_2 的线圈才会通电。这样就实现了只有在油泵电动机启动的前提下，主轴电动机才可能启动、停车。若油泵电动机停车，主轴电动机也将随之停车。

3．一台电动机停止运行后另一台才能停止的控制电路

一些工作过程中，有时要求在一台电动机停止运行之后，另一台电动机才可以停止运行。例如，整流子主机在开机之后，送冷分机电动机也需要启动运行，并且为了保证主电动机的正常工作，要求在主电动机不停止运行的情况下，风机是不能随时停止的。图 5.33 所示的线路就适用于此种主副电动机的控制要求。当按下按钮 SB_1 后，接触器 KM_1 吸合，风机启动运转，向主电动机送冷风，然后按下按钮 SB_3，KM_2 线圈通电，主电动机开始运行。由于 KM_2 吸合，KM_2 的常开触点将形成自锁。此时即使误操作按下按钮 SB_2，接触器 KM_1 的线圈也不会失电释放，而风机也就不会停止送冷风。只有当主机停止运转之后，KM_2 线圈失电，其常开触点释放，这时按下按钮 SB_2，风机才能停止运转。

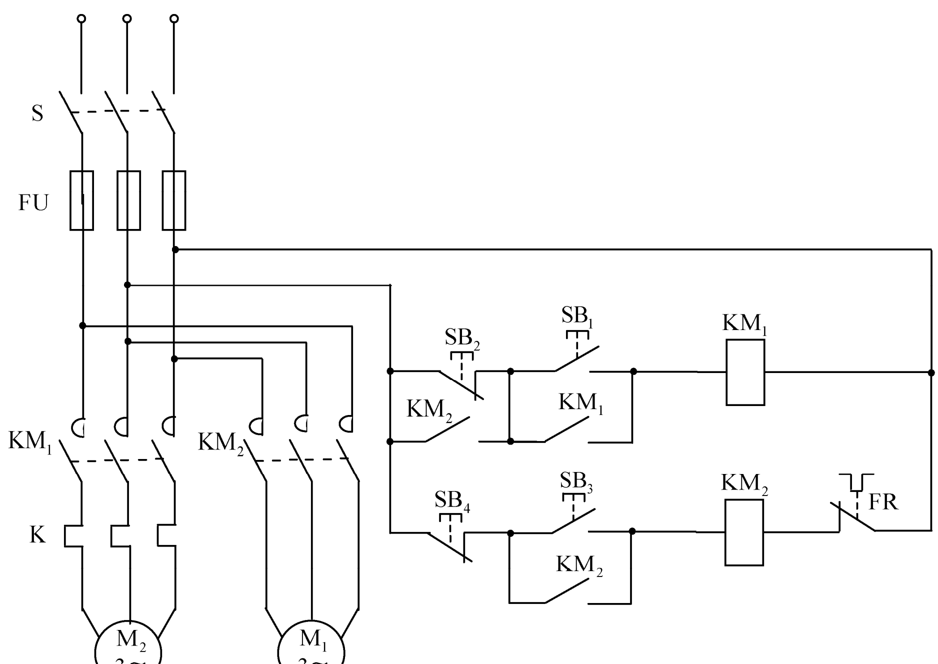


图 5.33　一台电动机停止运行后另一台才能停止的控制电路

5.8.2　几种继电控制应用电路

1．双密码电锁电路

一种双密码电锁线路如图 5.34 所示。图中 YA 为操纵锁闩或门闩的电磁铁。十个按钮

SB_1～SB_{10} 装在门外。其中 K_1、K_2 可选交流 220V 的中间继电器。

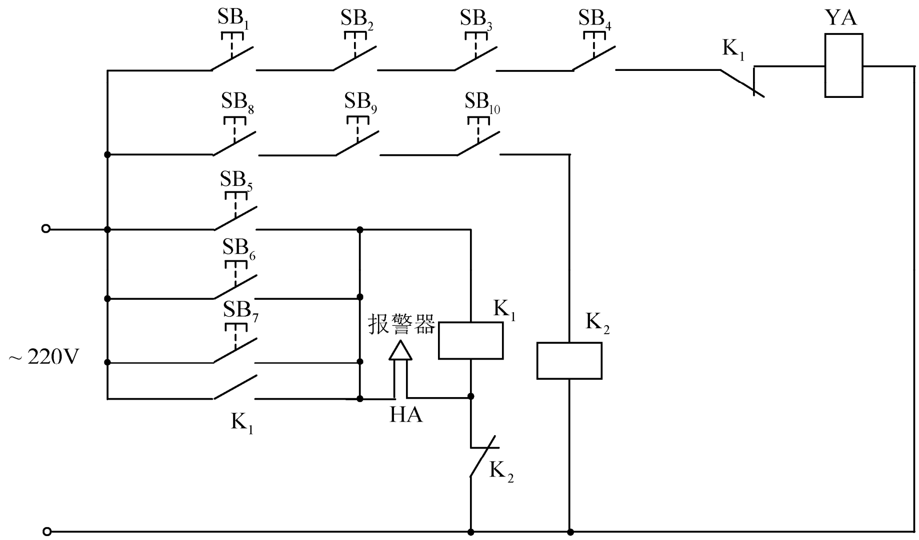


图 5.34　双密码电锁电路

按钮 SB_1～SB_{10} 可分别对应数字0～9，按钮 SB_8、SB_9、SB_{10} 同时为复位按钮。当开门时，按下密码0、1、2、3，即按下按钮 SB_1、SB_2、SB_3、SB_4 电磁铁YA通电，门打开。如果某人不知道密码，在尝试开锁过程中，按下按钮 SB_5～SB_7 中的任何一个，此时继电器 K_1 动作，其常闭触点 K_1 断开，电磁铁线圈电路将被切断，门不会打开，同时电铃将发出报警。在这种情况下，即使按下正确的密码按钮 SB_1、SB_2、SB_3、SB_4，电磁铁也不会通电，门自然不会打开。再要想开锁，就必须同时按下复位按钮 SB_8、SB_9、SB_{10}，使 K_2 线圈得电，其常闭触点断开，使 K_1 线圈断电，K_1 的常闭触点闭合，此时才能用密码开锁。若要改变密码的组合，改变按钮 SB_1～SB_{10} 的接线位置即可。

2．病房床位呼叫器

图 5.35 所示为病房床位呼叫器的电路，此呼叫器电路由设在医护值班室内的声、光报警主机和各个病房内床头上的按钮开关两大部分组成。图中 n 为自然数，由房间数确定。每间病房内的床位数确定了每间病房内需要安装的并联按钮开关的数量，图 5.35 中以 3 个为例。当病人（如 1 号病房的 1 床病人）需要帮助，按下其床头呼叫开关 $SB_{1\text{-}1}$ 时，值班室内的声、光报警器将接通 220V 交流电，此时扬声器发出报警，同时对应氖泡 HL_1 发出橘红光，医护人员可根据显示出来的呼叫者所处的病房及病床号，找到并帮助呼叫的病人。

该呼叫器巧妙地利用了交流 220V 的照明线路，使得从医护值班室至各病房的传输导线仅仅需要一条，具有安装方便、成本低廉、实用性强等特点。

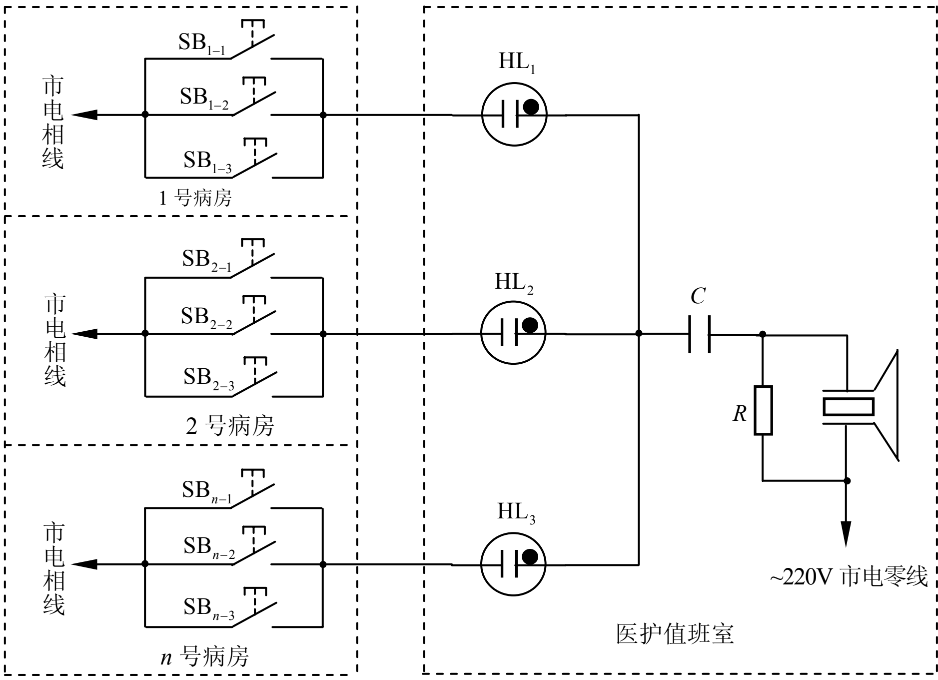


图 5.35　病房床位呼叫器电路

本 章 小 结

本章重点介绍了三相异步电动机的基本结构、工作原理、机械特性以及启动、制动和基本调速方法，还介绍了它们的铭牌数据和选择电动机方面的知识；简单介绍了几种常用的低压电器元件的用途、基本结构、工作原理及其选用的有关知识，并对三相异步电动机的基本控制电路做了介绍。

三相异步电动机分为笼型异步电动机和绕线式异步电动机两种，前者结构简单、价格便宜，运行、维护方便，使用广泛。后者启动、调速性能好，但结构复杂，价格高。

在三相异步电动机的三相定子对称绕组通入对称三相电流，产生一个空间旋转磁场；旋转磁场与转子绕组相互作用，产生电磁转矩，驱动电动机旋转。电动机转向与旋转磁场方向一致，由三相定子电流相序决定。

机械特性是指电动机转速与电磁转矩的关系特性，它是分析异步电动机运行性能的依据。额定转矩、最大转矩、启动转矩是使用和选择电动机的依据。

异步电动机的调速方式主要有变极调速、变频调速、按转差率调速。异步电动机的制动方式主要有能耗制动、反接制动和回馈制动。

铭牌数据是电动机的运行依据。额定电压、电流值是指线电压、线电流。

用继电器、接触器、按钮等电器组成控制电路，称为继电-接触器控制。电动机电气控制线路由主电路和控制电路两部分组成。分析主电路时要了解电动机的启动方法、正反转、制动方法等，为分析控制电路提供依据；分析控制电路时，要从控制主电路的接触器入手，由上而下、由左到右对各环节进行跟踪分析。

习　题　5

5.1　填空题

（1）三相异步电动机由_________和_________两部分构成。

（2）三相异步电动机的定子绕组是三相_________分布的，放置在定子铁心槽中。转子绕组有_________和_________两种形式。

（3）三相定子绕组通入三相对称电流后，产生的合成磁场是随时间在空间_________的。磁场的转向由通入绕组的三相电流的_________决定。三相电动机的磁极对数就是旋转磁场的_________，由每相定子绕组串联线圈数决定。旋转磁场的转速决定于_________和旋转磁场的_________，稍大于转子的转速。

（4）同步转速指的是_________的转速，异步转速是_________的转速。二者的相差程度用_________表示。

（5）如果三相交流异步电动机的同步转速为 n_0，异步转速为 n，则转差率 s=_________。

（6）三相异步电动机的机械特性曲线，是指当电源电压 U_1、f_1、和转子阻抗 R_2 及 X_{20} 一定的情况下，_________与_________的关系曲线或_________与_________的关系曲线。

（7）按照轴上输出的转矩（即负载转矩）T_2 和额定转矩 T_N 的关系，电动机可分为_________、_________、_________三种工作状态。

（8）与临界点对应的转矩是_________转矩。启动点的转矩称为_________。

（9）异步电动机的启动方式有_________启动和_________启动两种。交流电动机降压启动仅适用于：_________启动。（从轻载，满载，过载中选）

（10）三相交流异步电动机，采用Y-△启动时，启动电流 I_{ST} 将减小为直接启动时的_________，启动转矩减小为直接启动时的_________。

（11）三相异步电动机电气制动的方法一般有：_________、_________和发电反馈制动。

（12）当前交流电动机的调速主要是通过改变_________来实现的，即变_________调速。

（13）额定功率 P_N 是指电动机在额定运行时轴上_________的机械功率值。轴上的输出功率 P_N 与电源的输入功率 P_1 的比值是_________。

（14）对电动机的控制主要是指对它的_________、_________、_________、调速等进行控制。对电动机的保护是指_________、_________、断相以及欠压等故障保护。

（15）三相交流异步电动机的正反转可逆控制电路中，起到短路保护作用的器件是_________，具有过载保护作用的是_________，起到欠压、失压保护作用的器件是_________。

（16）熔断器是用来作_________保护，而热继电器是用来作_________保护的。

（17）常用低压电器元件中很多有触点，其中动合触点的释放状态（或称常态）为_________，动作状态为_________。其中动断触点的释放状态（或称常态）为_________， 动作状态为_________。

（18）电动机控制电路中，由闸刀开关、熔断器、交流接触器主触点和电动机构成的电路称为电动机控制电路的_________，该回路中的电流为电动机的线电流；由接触器线圈、“启动”、“停止”按钮，接触器常开辅助触点所构成的电路称为

________，该电路中的电流为线圈电流。

（19）在正反转控制电路中，各个动断辅助触点互相串联在对方的吸引线圈电路中，其目的是为了起到________作用。

5.2　有一台三相异步电动机，怎样根据结构上的特点，判断出它是笼式的还是绕线式的？

5.3　有一台四极三相异步电动机，已知电源频率为 50Hz，电动机运行的转差率为 0.03，求电动机的转速与同步转速。

5.4　有台笼式三相异步电动机，n_N＝1470r/min，f=50Hz。在（a）启动瞬间；（b）n=2n_0/3；（c）s＝0.02 三种情况下，试求：

（1）定子旋转磁场对定子的转速 n_0；

（2）定子旋转磁场对转子的转速△n；

（3）转子旋转磁场对转子的转速 n_2；

（4）转子旋转磁场对定子的转速；

（5）转子旋转磁场对定子旋转磁场的转速。

5.5　已知 Y100L1-4 型三相笼式异步电动机的某些额定技术数据如下：P_N =2.2kW，U_N=380V，Y接法，n_N=1420 r/min，$\cos\varphi_N = 0.82$，η_N=81%。试计算：

（1）相电流的额定值 I_{PN}，线电流的额定值 I_N，额定负载时的转矩 T_N。

（2）额定转差率 s_N，额定负载时转子电流的频率 f_{2N}，已知 f_N=50Hz。

5.6　有一台三相异步电动机，其技术数据如下：旋转磁场磁极对数 p=2，f=50Hz，n_N＝1425r/min，转子电阻 R_2=0.02Ω,电抗 X_{20}=0.08Ω，E_1/E_{20}=10，当 E_1=200V 时，试求：

（1）电动机启动瞬间（即 n=0，s=1），转子每相电路的电动势 E_{20}，电流 I_{20} 和功率因数 $\cos\varphi_{20}$；

（2）额定转速时的 E_2，I_2 和 $\cos\varphi_2$。

5.7　已知 Y132S-4 型三相异步电动机的额定技术数据如下：

功率	转速	电压	效率	功率因数	I_{st}/I_N	T_{st}/T_N	T_{max}/T_N
5.5kW	1440r/min	380V	8 5.5%	0.84	7	2.2	2.2

电源频率为 50Hz。试求额定状态下的转差率 s_N，电流 I_N，转矩 T_N，以及启动电流 I_{st}，启动转矩 T_{st}，最大转矩 T_{max}。

5.8　有一台四极三相异步电动机，其技术数据如下：n_N＝1440r/min，转子每相电阻 R_2=0.02Ω，电抗 X_{20}=0.08Ω，E_{20}=20，电源频率 f=50Hz。试求：

（1）电动机启动瞬间（即 n=0，s=1），转子电流 I_{20}；

（2）额定转速时的 I_2。

5.9　某三相异步电动机的额定电压 U_N=380V，△连接，额定功率 P_N=40kW，额定转速 n_N＝1470r/min，T_{st}/T_N=1.2。试求：

（1）启动转矩 T_{st}；

（2）如果负载转矩为额定转矩的 70%和 20%，能否采用Y-△换接启动？

5.10　一台三相异步电动机，△接法，额定功率 P_N=28kW，U_N=380V，I_N=58A，$\cos\varphi_N = 0.88$，n_N＝1455r/min，T_{st}/T_N=1.1，I_{st}/I_N=6，$\lambda = T_{max}/T_N = 2.2$。供电变压器要求启动电流不大于 150A，启动负载的阻转矩为 73N·m。分析以下三种启动方法，可以采用哪种。

（1）直接启动；

（2）Y-△换接启动；

（3）自耦变压器降压启动（抽头为 55%和 64%）。

5.11　已知 Y250M-4 型三相笼式异步电动机的额定技术数据如下：$P_N=55kW$，$U_N=380V$，$I_N=102.5A$，$n_N=1480r/min$，$\eta_N=92.6\%$，$\cos\varphi_N=0.88$，$T_{st}/T_N=2.0$，$I_{st}/I_N=7$，$T_{max}/T_N=2.2$，△连接，$f=50Hz$。试求：

（1）额定输人视在功率 S_{1N}、有功功率 P_{1N}。

（2）若该用户的供电变压器额定容量为 $S_N=560kVA$，试判断该电动机能否全压频繁启动？

（3）若供电线路要求该动机的启动电流 $I_{st}\leqslant 450A$，启动时负载转矩 $T_{Lst}\leqslant 180N\cdot m$，通过计算验正该电动机适合于哪种启动方法？

（4）若该电动机在运行过程中，轴上所带的负载转矩分别为 $T_L\leqslant 80N\cdot m$；$T_L=354N\cdot m$；$T_L=416N\cdot m$。则该电动机都分别运行于那种状态？

（5）若该电动机在运行过程中所带的是冲击负载，若其最大值分别 $T_{Lmax}\leqslant 458N\cdot m$；$T_{Lmax}\leqslant 700N\cdot m$，则该电动机在运行的过程中能否被堵转？

5.12　Y180L—6 型电动机的额定功率为 15kW，额定转速为 970r/min，频率为 50Hz，最大转矩为 295.36N·m。试求电动机的过载系数λ。

5.13　判断图 5.36 所示各电路能否正常工作，为什么？

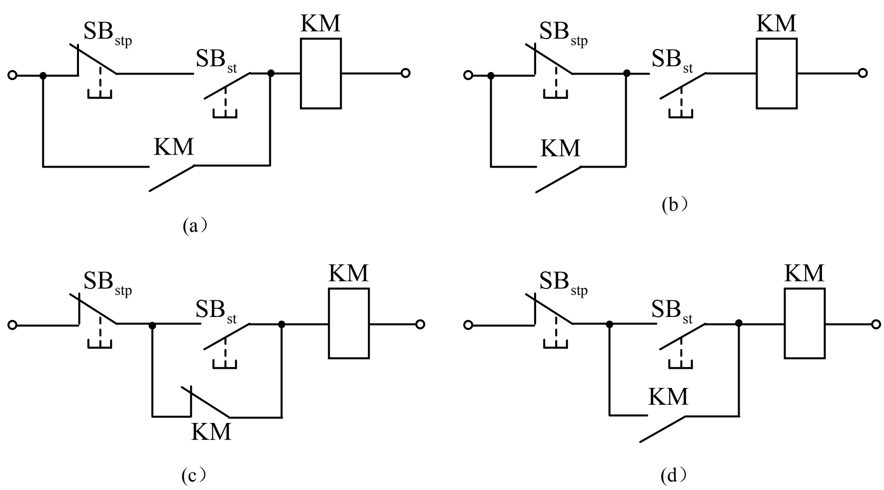


图 5.36　习题 5.13 图

5.14　指出图 5.37 所示正反转控制电路的错误之处并加以改正。

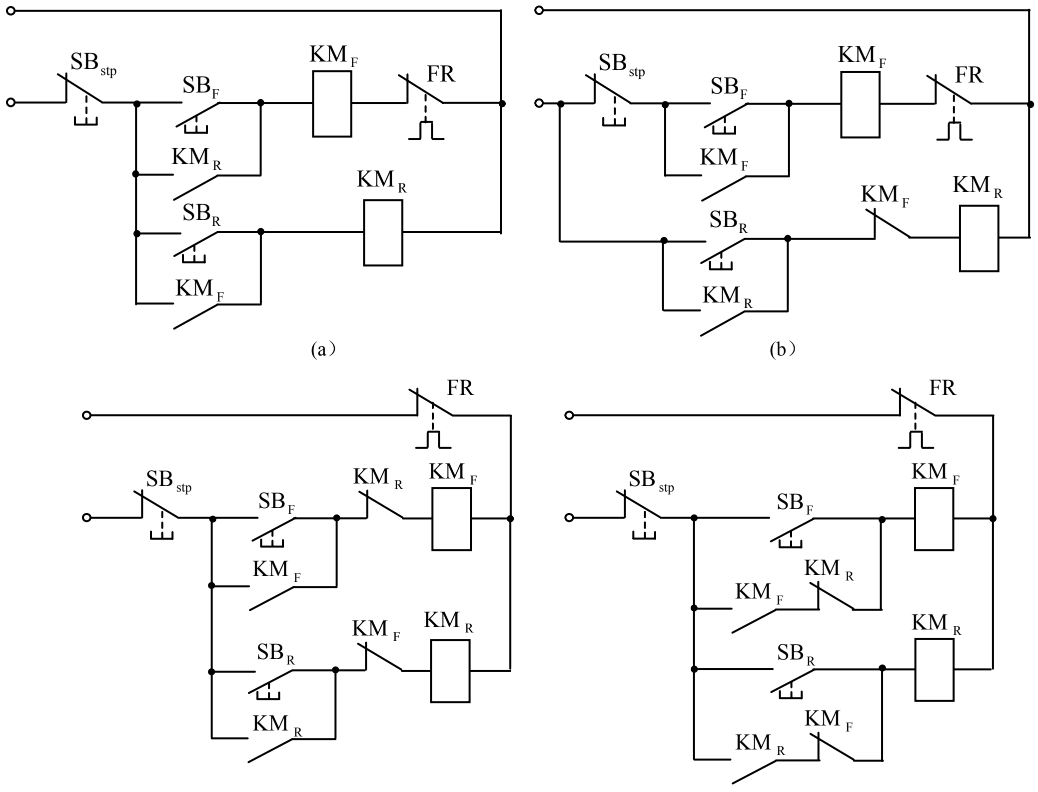
5.15　设计三相笼式异步电动机继电接触控制电路的电气原理图，要求不可逆控制，既能点动又能连续工作的。

5.16　某机床主轴由一台笼式三相异步电动机带动，润滑油泵由另一台三相笼式异步电动机带动。试求：

（1）主轴必须在油泵开动后，才能开动；

（2）主轴电机要求可逆控制，并能单独停车；

（3）有短路、失压及过载保护。试绘出控制电路的电气原理图。



(a)　　(b)

(c)　　(d)

图 5.37　习题 5.14 图

5.17　图 5.38 是三相异步电动机正反转控制电路，指出图中错误并加以改正。

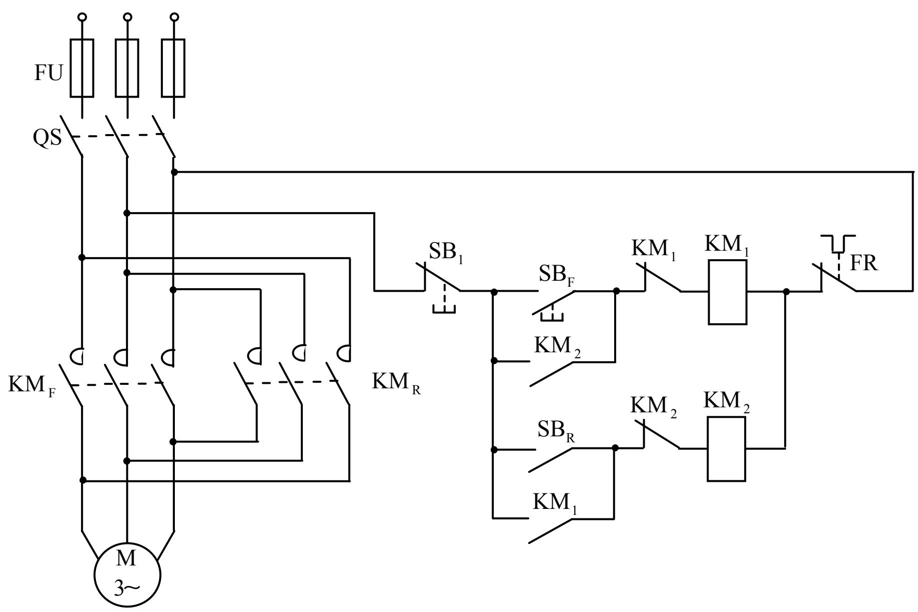


图 5.38　习题 5.17 图

第 6 章　半导体二极管及整流电路

半导体器件是组成电子设备的核心部件，而 PN 结是构成各种半导体器件的共同基础。本章在介绍半导体基本知识基础上，着重讨论 PN 结及其单向导电性，以及半导体二极管的基本结构、工作原理、导电特性及其应用电路等。本章是学习电子技术和分析电子电路必不可少的基础。

6.1　PN 结及其单向导电性

6.1.1　半导体基础知识

按照导电能力的不同，自然界的物质可分为导体、绝缘体和半导体。半导体就是导电能力介于导体和绝缘体之间的物质。常见的半导体材料有锗、硅和砷化镓等。半导体具有光敏性、热敏性、掺杂性的特点，在常态下，其导电能力接近于绝缘体，而在光照、受热或掺杂的情况下，其导电能力会明显增强而接近于导体。

1．本征半导体

本征半导体就是纯净晶体结构的半导体。在锗和硅的本征半导体晶体结构中，每个原子具有四个外层电子，与相邻原子结合组成四个电子对，形成共价键结构。位于共价键结构中的电子称为价电子，每对价电子被相邻两个原子共同拥有，如图 6.1 所示。

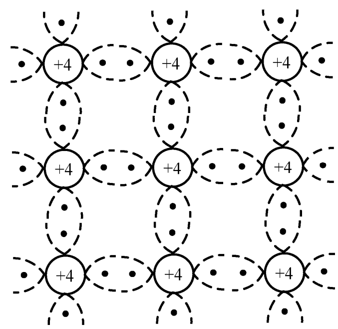


图 6.1　本征半导体的共价键结构

在共价键结构中，原子最外层虽然具有八个电子而处于较为稳定的状态，但是共价键中的价电子并不像绝缘体的外层电子被束缚的那样紧。在获得一定的能量后，少数价电子即可挣脱原子核的束缚，成为自由电子，同时在共价键中留下相应的空位置，称为空穴。这样，在半导体中就存在两种载流子：带负电的自由电子和带正电的空穴。在外电场作用下，半导体中的自由电子和空穴都会产生定向运动而形成电流。因此，在半导体中同时存在电子导电和空穴导电，这是半导体区别于导体的本质特征。本征半导体中自由电子和空穴的数量很少，所以其导电性能很差。

2．杂质半导体

在本征半导体中掺入微量的杂质，就成为具有导电能力的杂质半导体。根据掺入杂质性质的不同，杂质半导体可分为 N 型半导体和 P 型半导体。

（1）N 型半导体。

在本征半导体中掺入微量的五价元素，形成 N 型半导体。

如图 6.2 所示，在纯净的硅晶体中掺入五价元素磷，晶体中某些位置上的硅原子被磷原子取代。磷原子的五个外层电子中有四个参加了共价键结构，多余的第五个外层电子没有共价键的束缚，极易挣脱磷原子核的束缚而成为自由电子，结果半导体中的自由电子的数目大量增加，导电能力明显提高。这种以自由电子导电为主要导电方式的半导体称为 N 型半导体。N 型半导体中，自由电子是多数载流子，空穴是少数载流子。

由激发产生的自由电子和空穴是成对出现的，而由掺杂产生的自由电子和杂质磷原子失去一个外层电子变成的正离子也是成对出现的，因此，N 型半导体仍然是电中性的。

（2）P 型半导体。

在本征半导体中掺入三价元素，形成 P 型半导体。

在纯净的硅晶体中掺入硼（或其他三价元素），每个硼原子只有三个外层电子，故在形成共价键结构时，将因缺少一个电子而形成一个空穴，如图 6.3 所示。这样，在半导体中就形成了大量空穴。这种以空穴导电为主要导电方式的半导体称为 P 型半导体。P 型半导体中，空穴是多数载流子，自由电子是少数载流子。

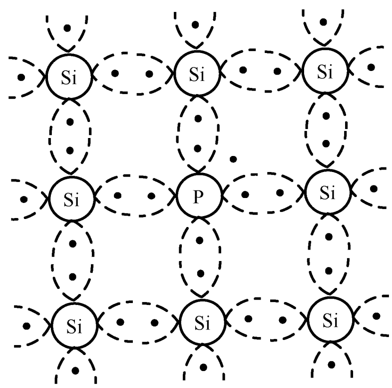


图 6.2　N 型半导体结构示意图

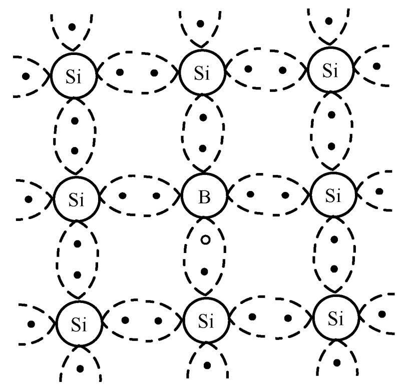


图 6.3　P 型半导体结构示意图

同 N 型半导体一样，P 型半导体虽然也具有多数载流子和少数载流子，但就整体而言，仍为电中性。

6.1.2　PN 结及其单向导电性

1．PN 结的形成

如果采取一定的生产工艺将 P 型半导体和 N 型半导体加工在同一块半导体材料上，在它们的交界面处就形成了 PN 结，如图 6.4 所示。

P 型半导体部分称为 P 区，N 型半导体部分称为 N 区。由于 P 区的空穴浓度远远大于 N 区，而 N 区的自由电子浓度远远大于 P 区，则 P 区的空穴和 N 区的自由电子分别向对方扩散。结果，在交界面附近的 P 区一侧留下不能移动的杂质负离子，形成负电荷区；而在 N 区一侧留下不能移动的杂质正离子，形成正电

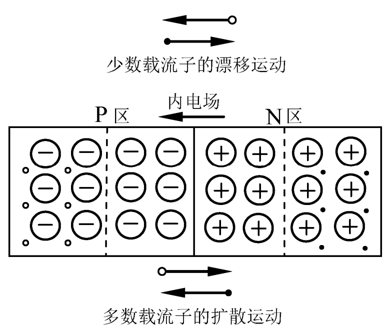


图 6.4　PN 结的形成

荷区。这样，在 P 型半导体和 N 型半导体的交界面处就形成了一个空间电荷区，这个空间电荷区就是 PN 结。同时，P 区负离子与 N 区正离子形成一个由 N 区指向 P 区的电场，称为内电场。内电场对多数载流子的扩散运动起阻碍作用，但可推动少数载流子越过空间电荷区进入对方。少数载流子在内电场作用下产生的定向运动称为漂移运动。

在没有外加电场的作用时，PN 结的扩散运动和漂移运动最终达到动态平衡状态，PN 结中净电流为零。

2．PN 结的单向导电性

如果在 PN 结的两端外加不同方向的电压，就可以破坏原来的动态平衡，而呈现出单向导电性。

（1）PN 结外加正向电压。

PN 结外加正向电压，就是外加电源的正极接 P 区，负极接 N 区，如图 6.5 所示，称 PN 结正向偏置，简称正偏。此时，外加电源在 PN 结上形成一个外电场，方向与内电场方向相反，内电场对扩散运动的阻碍作用被削弱，多数载流子的扩散运动增强。同时，外加电源的两极不断为两个区补充多数载流子，在整个回路中形成多数载流子的连续定向移动，形成由 P 区流向 N 区的正向电流。此时 PN 结所呈现的电阻为正向电阻，其值很小，PN 结处于导通状态。

在一定范围内，PN 结所加的正向电压越大，其正向电流越大。

（2）PN 结外加反向电压。

PN 结外加反向电压，就是外加电源的正极接 N 区，负极接 P 区，如图 6.6 所示，称 PN 结反向偏置，简称反偏。此时外电场与内电场的方向一致。增强了内电场对多数载流子的阻碍作用，多数载流子的扩散运动趋于中断，而少数载流子的漂移运动加强。少数载流子的漂移运动在电路中形成了由 N 区流向 P 区的反向电流。由于少数载流子的数量极少，所以反向电流很小。此时 PN 结呈现反向电阻，其值很大，PN 结处于截止状态。

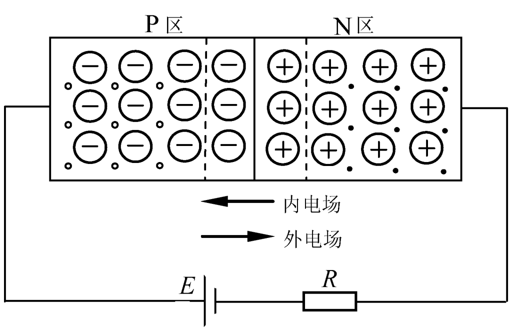


图 6.5　正向偏置的 PN 结

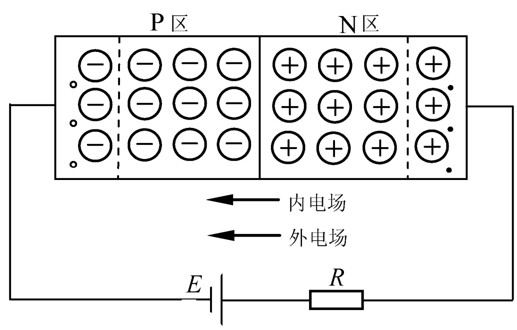


图 6.6　反向偏置的 PN 结

综上所述，PN 结外加正向电压时，呈现低阻性，正向电流较大，处于导通状态；PN 结外加反向电压时，呈现高阻性，反向电流很小，处于截止状态。因此，PN 结具有单向导电性。

6.2　半导体二极管

6.2.1　基本结构

将 PN 结外加相应的电极引线和管壳封装，就成为半导体二极管。由 P 区引出的电极称为阳极（或正极），由 N 区引出的电极称为阴极（或负极）。

根据结构的不同，二极管分为点接触型和面接触型两类，如图 6.7 所示。点接触型二极管的 PN 结面积很小，无法承受较大电流，但其高频性能好，故一般适用于高频和小功率电路，还可在数字电路中作开关元件。面接触型二极管的 PN 结面积很大，故可通过较大电流，但其工作频率较低，主要用于低频整流电路。二极管的电路符号如图 6.7（c）所示。

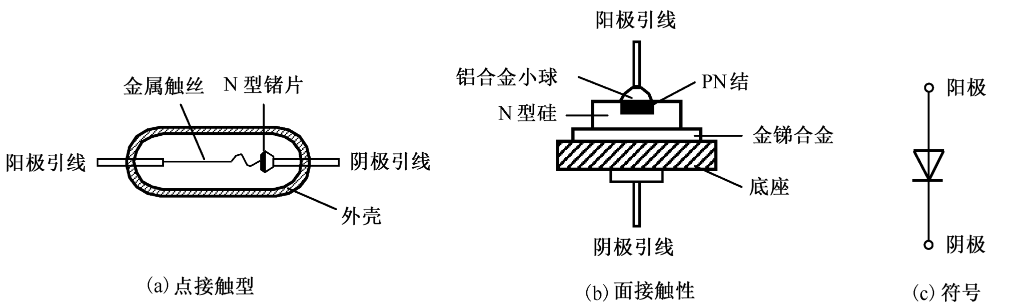


图 6.7　半导体二极管

6.2.2　伏安特性

加在二极管两端的电压与通过管子的电流之间的关系，称为二极管的伏安特性。硅二极管和锗二极管的伏安特性如图 6.8 所示。

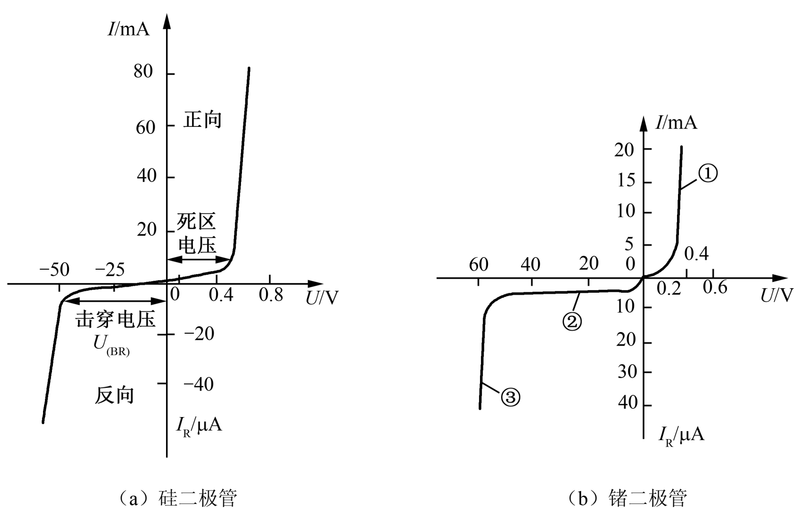


图 6.8　二极管的伏安特性

1．正向特性

二极管外加正向电压时的特性称为正向特性，对应于图6.8中①段曲线。

当管子的正向电压较小时，由于外电场还不足以克服PN结的内电场对扩散运动的阻力，因此这时的正向电流很小，几乎为零，二极管呈现高阻性。当正向电压超过一定数值后，内电场被大大削弱，正向电流明显增大，管子呈现低阻性。这个一定数值的正向电压称为门槛电压或死区电压，其大小与材料及温度有关。通常硅管的死区电压约为0.5V，锗管约为0.1V。当外加电压超过死区后，管子才处于正向导通状态。二极管正向导通时的管压降很小，硅管约为0.7V，锗管约为0.2V。

2．反向特性

反向特性对应于图6.8中②段曲线。在二极管上加反向电压时，由于少数载流子的漂移运动，形成很小的反向电流。反向电流有两个特点：一是它随温度的上升增长很快，二是反向电压在某一范围内时，反向电流的大小基本不变，通常称为反向饱和电流。

3．反向击穿特性

反向击穿特性对应于图中的③段曲线。当外加反向电压超过某一数值时，反向电流突然增大，二极管失去了单向导电性，这种现象称为反向击穿。产生击穿时加在二极管上的电压称为反向击穿电压$U_{(BR)}$。

击穿发生在空间电荷区，分为电击穿和热击穿。电击穿过程是可逆的，当加在管子两端的反向电压降低后，管子仍可以恢复正常状态。如果电击穿后，引起PN结过热而烧毁，这种现象称为热击穿。热击穿将造成管子永久性的损坏，因此必须避免。

6.2.3　开关特性

二极管最显著的特点是正向导通，反向截止，所以在数字电路中，二极管常作为开关元件来使用。

1．导通条件及导通时的特点

当外加电压大于死区电压时，管子开始导通，此后电流I随正向电压的增加而急剧增加，在硅管正向电压U=0.7V时，I在一定范围内变化，U基本保持在0.7V左右。因此在数字电路的分析和估算中，常把U>0.7V看作是硅二极管导通的条件。一旦导通后，就近似认为U保持0.7V不变，如同一个具有0.7V压降的闭合了的开关。

2．截止条件及截止时的特点

当外加正向电压U小于死区电压时，电流已经很小。因此在数字电路的分析估算中，常把U<0.5V看成是硅二极管的截止条件，一旦截止后，就近似认为I=0，如同断开了的开关。

实际分析电子电路时，常把二极管看作理想开关：当正向电压大于零时，二极管导通，相当于开关闭合，闭合后开关压降为零，因此二极管阴极、阳极电位相同；当正向电压小于零时，二极管截止，相当于开关断开，因此反向电流为零。

3．开关时间

在数字电路中，二极管的开关频率很高，所以开关时间是一个重要概念。

（1）开启时间：二极管由反向截止转换为正向导通所需要的时间。一般可忽略不计。

（2）关断时间：二极管由正向导通转换为反向截止所需要的时间。一般是几纳秒。

6.2.4　主要参数

半导体器件的主要参数是用来表征器件的质量指标和安全使用范围的，是正确选择和使用器件的依据。二极管的主要参数如下。

（1）最大整流电流 I_{FM}。

二极管长期工作时允许通过的最大正向平均电流。当电流超过此允许值时，会因过热而烧坏二极管。

（2）最高反向工作电压 U_{RM}。

二极管工作时允许外加的最大反向电压。通常 U_{RM} 约为反向击穿电压 $U_{(BR)}$ 的一半。

（3）反向电流 I_R。

在规定的温度和最高反向电压作用下，流过二极管的反向电流。反向电流越小，管子的单向导电性越好。反向电流是一个受温度影响较大的参数，使用时应注意其工作温度。硅二极管比锗二极管在高温下具有更好的稳定性。

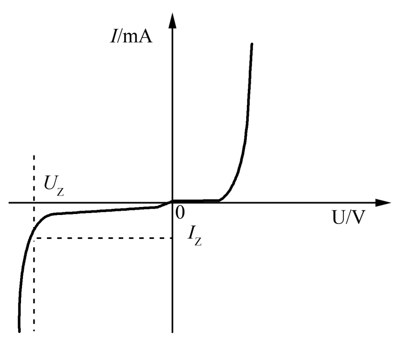
6.2.5　几种常用的特殊二极管

1．稳压二极管

稳压管是一种特殊的面接触型半导体硅二极管，其伏安特性及图形符号如图 6.9 所示。



（a）图形符号



（b）特性曲线

图 6.9　稳压管

稳压管工作在反向击穿区。从反向特性曲线上可以看出，反向电压在一定范围内变化时，反向电流很小；当反向电压增大到击穿电压时，反向电流突然剧增，稳压管被击穿。此后，电流虽然在很大范围内变化，但稳压管两端的电压变化很小。利用这一特性可起到稳压作用。稳压管的反向击穿在一定范围内属电击穿，是可逆的。但是，如果反向电流超过允许范围，稳压管将会发生热击穿而损坏。

稳压管的主要参数有以下几个。

（1）稳定电压 U_Z。

即稳压管的反向击穿电压，也是稳压管的工作电压。由于制造工艺不易控制，同一型号的稳压管的稳定电压值有一定的分散性，例如 2CW11 稳压管的稳压值为 3.2～4.5V。但就一只管子而言，在温度一定时，其稳定电压是一个定值。

（2）稳定电流 I_Z。

稳压管工作在稳压状态而不被热击穿时的工作电流。

（3）最大稳定电流 I_{ZM}。

稳压管允许长期通过的最大反向电流。

（4）动态电阻 r_Z。

稳压管电压变化量与电流变化量的比值，即 $r_Z = \Delta U_Z / \Delta I_Z$ 。

此值越小，稳压性能越好。

2．光电二极管

光电二极管也称光敏二极管，是一种将光信号转换为电信号的半导体器件，由具有光敏特性的半导体材料制成。光电二极管是在反向电压下工作的。无光照时，反向电流很小，称为暗电流；有光照时，其反向电流随光照强度增加而增大，称为光电流。光电二极管常作为光电控制器件或用来进行光的测量，其电路如图 6.10 所示。

3．发光二极管

发光二极管（简称 LED）是一种将电能转换为光能的半导体器件，当 PN 结有正向电流通过时即可发光。发光二极管常用作显示器件，除单个使用外，还可制成七段式或点阵式显示器，如图 6.11 所示。发光二极管的发光颜色取决于所用材料，常见的发光颜色有红、绿、黄、橙等。

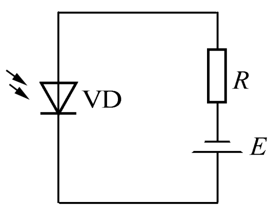


图 6.10　光电二极管电路

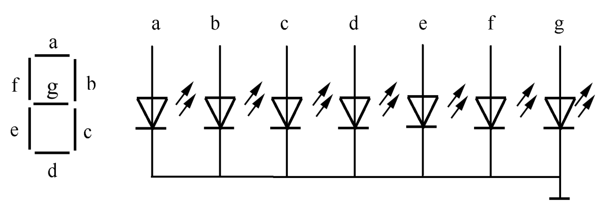


图 6.11　发光二极管（LED）

例 6.1 如图 6.12（a）所示电路是由二极管构成的电路，输入电压 u_i 为正弦波，幅值为 $2E$，如图 6.12（b）中虚线所示。试分析输出电压 u_o 的波形。

解：当 $E < u_i < 2E$ 时，VD_1 承受正向电压导通，VD_2 承受反向电压截止，$u_o = E$；

当 $-E < u_i < E$ 时，VD_1、VD_2 均承受反向电压而截止，$u_o = u_i$；

当 $-2E < u_i < -E$ 时，VD_2 承受正向电压导通，VD_1 承受反向电压截止，$u_o = -E$ 。

输出电压 u_o 的波形如图 6.12（b）中实线所示。可见，输入信号的正负两个半波的幅度同时受到限制。这种双向限幅电路常用于限制信号范围，以达到保护的目的。

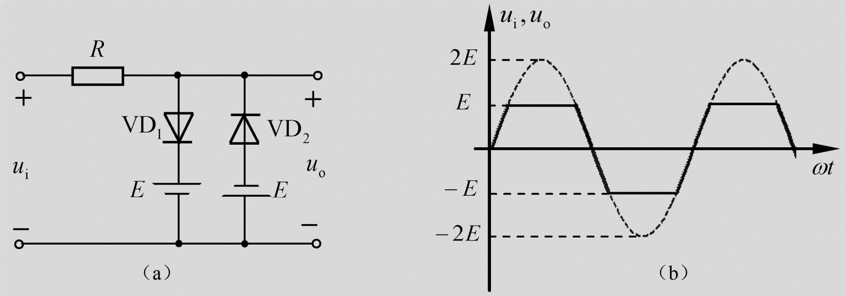


图 6.12　例 6.1 图

6.3　二极管整流滤波电路

很多用电场合需要稳定的直流电源供电，而供电系统所提供的是工频交流电。因此，需要将交流电转换为直流电。交流电通过整流、滤波、稳压，可获得需要的直流电。二极管最广泛的应用之一就是用于整流电路。

6.3.1　单相半波整流电路

单相半波整流电路如图 6.13 所示，它由电源变压器 Tr，二极管 VD 及负载电阻 R_L 组成。Tr 的作用是将电网电压变成适当大小的交流电压。

设变压器二次侧电压为

$$u_2 = \sqrt{2}U_2 \sin \omega t \qquad (6\text{-}1)$$

二极管具有单向导电性，只有在正向偏置时才能导通。在 u_2 的正半周，二极管承受正向电压而处于导通状态，电流从 a 点流出，经过二极管 VD、负载电阻 R_L 流入 b 点。忽略二极管 VD 上的正向电压，则负载 R_L 上的电压 $u_L=u_2$；在 u_2 的副半周，二极管反向偏置而处于截止状态，负载 R_L 上没有电流流过，输出电压 $u_L=0$。可见，由于二极管的单向导电性，在负载 R_L 上得到单方向脉动的电压，如图 6.14 所示。

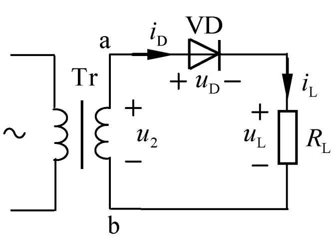


图 6.13　单相半波整流电路

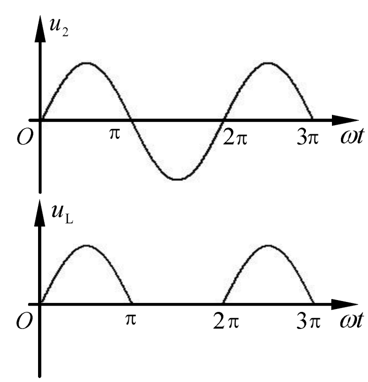


图 6.14　单相半波整流电压电流波形

根据整流波形可求得整流输出电压的平均值。在单相半波整流电路中，每个周期只有半个周期得到了输出电压，则输出电压平均值为

$$U_L = \frac{1}{2\pi}\int_0^{\pi}\sqrt{2}U_2 \sin\omega t \mathrm{d}(\omega t) \approx 0.45U_2 \tag{6-2}$$

流过负载的电流平均值为

$$I_{\mathrm{L}} = \frac{U_{\mathrm{L}}}{R_{\mathrm{L}}} = 0.45\frac{U_2}{R_{\mathrm{L}}} \tag{6-3}$$

整流二极管与负载在同一支路上，故二极管的正向平均电流等于负载电流平均值，即

$$I_{\mathrm{D}} = I_{\mathrm{L}} = 0.45\frac{U_2}{R_{\mathrm{L}}} \tag{6-4}$$

二极管反向截止时，负载上无输出，二极管承受的电压就是变压器的二次侧电压。所以，二极管承受的最大反向电压为

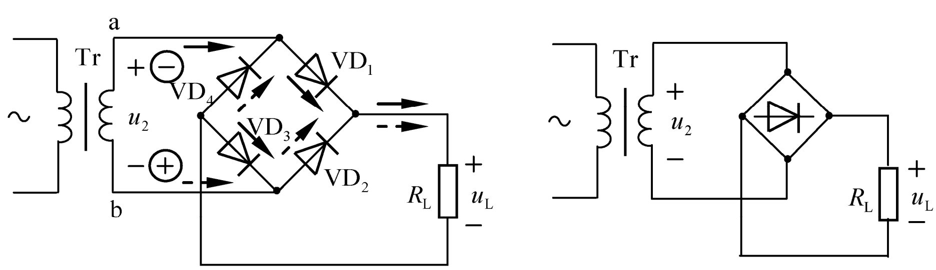
$$U_{\mathrm{RM}} = \sqrt{2}U_2 \tag{6-5}$$

实际选择二极管时，考虑电网电压的波动等因素影响，对最大正向平均电流和最高反向工作电压至少应留有 10%的余地，以保证二极管的安全工作。

单相半波整流电路结构简单，但只利用了交流电压的半个周期，因此输出电压低，脉动大，效率低。这种电路一般只适用于整流电流小、对脉动要求不高的场合。

6.3.2　单相桥式整流电路

图 6.15 为单相桥式整流电路，四只二极管 VD_1～VD_4 组成两对桥臂，接成桥形。



(a) 电路原理图　　(b)简化画法

图 6.15　单相桥式整流电路

设变压器二次侧电压为 $u_2 = \sqrt{2}U_2 \sin\omega t$ 。当 u_2 处于正半周时，a 点电位高于 b 点电位，二极管 VD_1、VD_3 正向偏置而处于导通状态，电流方向如图 6.15（a）中实线所示，即由 a 点流出，经 VD_1、R_L、VD_3 回到 b 点。忽略 VD_1、VD_3 的正向压降，输出到负载的电压 $u_L=u_2$。此时 VD_2、VD_4 承受反向电压而截止。

当 u_2 处于负半周时，a 点电位低于 b 点电位，二极管 VD_2、VD_4 外加正向电压而处于导通状态，电流方向如图 6.15（b）中虚线所示，即由 b 点流出，经 VD_2、R_L、VD_4 回到 a 点，忽略 VD_2、VD_4 的正向压降，$u_{\mathrm{L}} = |u_2|$，此时 VD_1、VD_3 承受反向电压而截止。

这样，VD_1、VD_3 和 VD_2、VD_4 两两交替导通，使得负载电阻 R_L 在交流电源正、负两个半周内均有电流流过，且方向不变，故输出为单方向脉动电压，称为全波整流。图 6.16 所示为单相桥式整流电路各部分的电压、电流波形。

全波整流时，在 u_2 的副半周负载也有输出电压，所以输出电压的平均值是半波整流电

路的两倍，即

$$U_{\mathrm{L}}=\frac{1}{\pi}\int_{0}^{\pi}\sqrt{2}U_2\sin\omega t\mathrm{d}(\omega t)\approx 0.9U_2 \qquad (6\text{-}6)$$

输出电流平均值为

$$I_L=\frac{U_L}{R_L}=0.9\frac{U_2}{R_L} \qquad (6\text{-}7)$$

因为每只二极管只在半个周期内导通，因此二极管的平均电流只有负载电流的一半，即

$$I_{\mathrm{D}}=\frac{1}{2}I_{\mathrm{L}}=0.45\frac{U_2}{R_{\mathrm{L}}} \qquad (6\text{-}8)$$

处于截止状态的一对二极管分别通过一个导通的二极管承受变压器的二次电压，则二极管承受的最大反向电压为

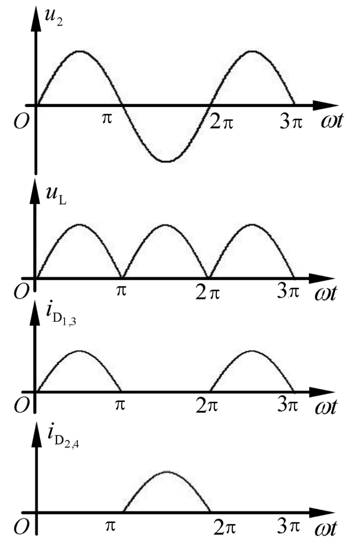


图 6.16　桥式整流电路波形波形

$$U_{\mathrm{RM}}=\sqrt{2}U_2 \qquad (6\text{-}9)$$

与单相半波整流电路相比，单相桥式整流电路在变压器二次侧电压相同的情况下，对二极管的参数要求是一样的，而且具有直流输出电压高、脉动小、变压器利用率高等优点，因此得到应用广泛。

例 6.2 单相桥式整流电路，要求输出 18V 的直流电压和 90mA 的直流电流，试求：(1) 电源变压器的二次侧电压有效值 U_2；(2) 整流元件所要承受的最大反向电压 U_{RM}，并选择二极管型号。

解：(1) 电源变压器的副边电压有效值为

$$U_2=\frac{U_{\mathrm{L}}}{0.9}=\frac{18}{0.9}=20\mathrm{V}$$

(2) 二极管所承受的最大反向电压为

$$U_{\mathrm{RM}}=\sqrt{2}U_2=1.41\times 20=28.2\mathrm{V}$$

二极管流过的电流平均值为

$$I_{\mathrm{D}}=\frac{1}{2}I_{\mathrm{L}}=\frac{1}{2}\times 90=45\mathrm{mA}$$

选择二极管时，应使其最大整流电流 I_{FM} 大于其工作时的正向平均电流 I_{D}；最高反向工作电压要比实际承受的最大反向电压大一倍左右。查电工手册，可选择 2CP11，其最大整流电流为 100mA，最高反向电压为 50V。

6.3.3　滤波电路

整流电路的输出电压是一个脉动电压，虽然方向不变，但含有较大的交流成分，不宜

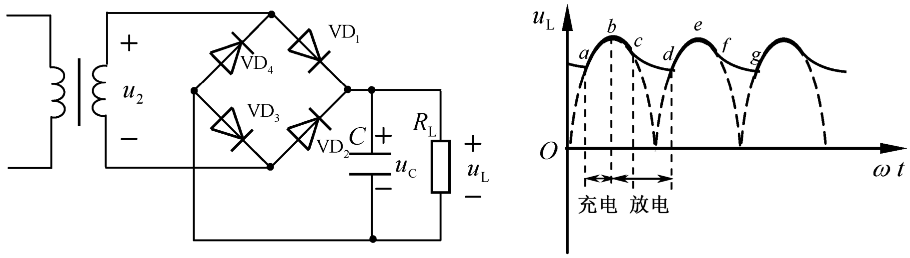
直接用作直流电源。为了得到更平滑的直流，可以在整流电路和负载之间加接滤波电路，使输出电压的脉动成分降低。

1．电容滤波电路

电容滤波电路就是在整流电路的输出端与负载之间并联一个电容，利用电容的充放电作用储存和补充电能，提高输出电压，使负载电压趋于平滑。如图 6.17 所示，当 u_2 处于正半周且大于电容电压 u_C 时，二极管 VD_1、VD_3 正向偏置而导通，电流一路流经负载电阻 R_L，一路对电容 C 充电，电容两端电压 u_L 与 u_2 相同，见图 6.17（b）中曲线的 ab 段。

当 u_2 上升到峰值后（图中 b 点），u_2 开始按正弦规律下降，电容按指数规律放电，开始趋势与 u_2 基本相同，见图 6.17（b）曲线的 bc 段。

当 u_2 下降到一定值后，u_C 的下降速度就会小于 u_2 的下降速度，使 u_C 大于 u_2，此时 VD_1、VD_3 变为反向偏置而截止，电容通过 R_L 自由放电，见图 6.17（b）中曲线的 cd 段。



（a）电路图　　（b）波形图

图 6.17　桥式整流滤波电路

在 u_2 的负半周，当 $|u_2|$ 恰好大于 u_C 时，VD_2、VD_4 开始承受正向电压而导通，电容 C 停止放电；随后 u_2 再次对 C 充电，如图 6.17（b）中曲线的 de 段。u_C 上升到 u_2 的峰值后（图中 e 点）又开始下降，下降到一定值时（图中 f 点），VD_2、VD_4 截止，C 通过 R_L 放电，u_C 按指数规律下降；下降到一定值（图中 g 点），VD_1、VD_3 导通，重复上述过程。

从波形上看，加上电容进行滤波处理后，输出电压的波形不仅变得平稳了，而且平均值也提高了。

电容滤波电路结构简单，轻载时脉动较小，输出电压较高，但带载能力较差，常用于要求输出电压较高、负载电流较小且变化也较小的场合。

有电容滤波的整流电路的输出电压大于无滤波时的输出电压。为了获得较好的滤波效果，一般要求

$$R_L C \geqslant (3\sim5)\frac{T}{2} \tag{6-10}$$

式中 T 为电源电压周期，电容 C 的大小一般为几十微法到几千微法，所以必须选用电解电容器。在接入电路时，应注意电容的极性不要接反，电容的耐压值应大于 $\sqrt{2}U_2$。

工程上，在满足式（6-10）的情况下，带电容滤波的单相桥式整流电路的输出电压的平均值一般按如下经验公式计算：

$$U_L = 1.2U_2 \tag{6-11}$$

若采用半波整流，滤波电容应选得更大些，此时 $U_L \approx U_2$。

2．电感滤波电路

电感滤波就是在整流电路和负载电阻之间串联一个电感线圈 L，如图 6.18 所示。

当电感线圈中的电流发生变化时，电感线圈会产生自感电动势阻碍电流的变化。当流过电感的电流增加时，自感电动势方向与电流方向相反，限制电流变化使其缓慢增加，同时将部分电能转化成磁场能储存在电感中；当电流减小时，自感电动势与电流方向相同，阻碍电流的减小，同时释放出储存的能量，以补偿电流使其缓慢减小。因此利用电感可以减小输出电流和电压的脉动，从而得到较平滑的直流电。

电感滤波输出电压较电容滤波为低，故一般电感滤波适用于输出电压不高、输出电流较大及负载变化较大的场合。

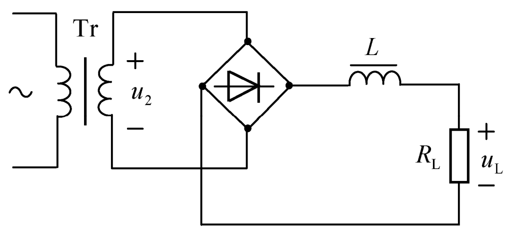


图 6.18　桥式整流电感滤波电路

3．复式滤波电路

为了进一步减小输出电压的脉动成分，可以采用复式滤波电路。电感和电容是基本的滤波元件，只要合理地接入电路均可达到滤波目的。图 6.19 为几种常见的复式滤波电路。

（1）L 型 LC 滤波电路。

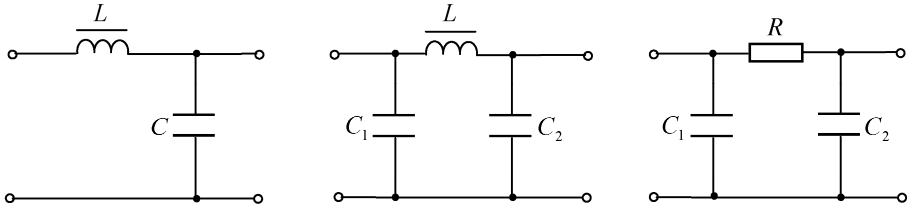
为了减小负载电压中的脉动成分，在电感的后面再接一电容与负载相并联，如图 6.20（a）所示。整流输出电压经电感滤波后，绝大部分交流成分降落在电感上，电容对交流近似短路，所以输出电压中交流成分极少，负载电阻上得到一个更平滑的电压。由于整流后先经电感滤波，其总特性与电感滤波电路相近，又称电感型 LC 滤波电路。

（2）π 型 LC 滤波电路。

如图 6.19（b）所示为 π 型 LC 滤波电路。整流输出电压经过电容 C_1 滤波后，脉动成分已经很小，剩余的交流成分又绝大部分落在电感上，C_2 上的交流成分已极少，输出端几乎可以得到平直的输出电压，滤波效果非常好。由于整流后先经电容滤波，其总特性与电容滤波电路相近。

（3）π 型 RC 滤波电路。

由于铁芯线圈体积大、成本高，在小功率整流电路中，有时为进一步减小纹波电压，也采用 π 型 RC 滤波电路，如图 6.19（c）所示。整流输出电压先经电容 C_1 滤波滤去大部分交流成分，只要保证 $R >> 1/(\omega C_2)$，剩下的少部分交流成分又多数降落在电阻 R 上并被 C_2 旁路，所以，R 越大，C_2 越大，滤波效果越好。



(a)L 型 LC 滤波电路　(b)π 型 LC 滤波电路　(c)π 型 RC 滤波电路

图 6.19　常见复式滤波电路

例 6.3 某负载要求直流电压 U_L=30V，直流电流 I_L=0.5A，采用带电容滤波的单相桥式整流电路（如图 6.17 所示）作直流电源。试计算滤波电容器的电容量并确定其最大工作电压值，选择电容器。

解：将 $R_L = U_L / I_L$ 代入式（6-10），滤波电容的容量为

$$C \geqslant \frac{(3\sim5)\frac{T}{2}I_L}{U_L} = \frac{(3\sim5)\frac{0.02}{2}\times0.5}{30} = (500\sim833)\ \mu F$$

取 C=833μF，可选容量为 1000μF 的电解电容器。则变压器二次侧电压为

$$U_2 = \frac{U_L}{1.2} = \frac{30}{1.2} = 25V$$

电容两端可能加上的最大工作电压等于变压器二次侧电压的最大值 $\sqrt{2}U_2 = 35.4V$。实际可选择容量为 1000μF，耐压为 50V 的电容。

6.3.4　稳压电路

整流滤波电路虽然能将正弦交流电压变换成较为平滑的直流电压，但当电网电压波动或负载变化时，稳定性较差，影响电路和仪器设备的正常工作。为了获得稳定性能更好的直流电压，需要增加稳压环节。稳压电路由稳压管和限流电阻组成，一般接在滤波环节之后，如图 6.20 所示。

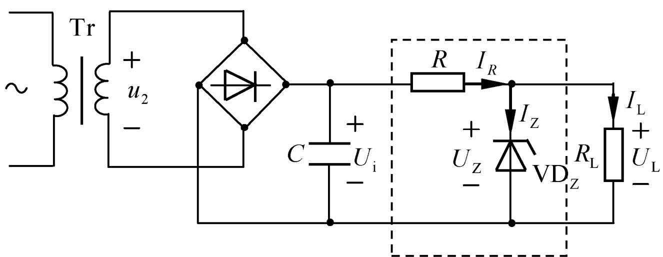


图 6.20　稳压管稳压电路

1. 工作原理

引起电压不稳定的主≥要原因是电网电压波动和负载变化。从图 6.20 中可以看出

$$U_L = U_i - RI_R = U_i - R(I_Z + I_L) \tag{6-12}$$

当电网电压升高时，引起稳压电路的输入电压 U_i 增大，必然引起 U_L 有随之升高的趋势，即稳压管两端的电压 U_Z 有升高的趋势。这就导致 I_Z 显著增加，于是，限流电阻 R 上的电压降也随之急剧增加。只要限流电阻选择合适，在限流电阻上的压降变化就可以抵消 U_i 的变化，使输出电压 U_L 基本保持不变。

当负载发生变动，如电阻 R_L 减小时，在 U_i 稳定的情况下，负载电流 I_L 有增大趋势，使得限流电阻 R 的电流和电压降随之增大，U_L 有减小的趋势，即 U_Z 有减小的趋势，其结果导致 I_Z 明显减小，使 I_R 仍维持原有数值保持 U_R 不变，结果使得 U_L 得到稳定。

可以看出，稳压电路的稳压作用，是通过稳压管的电流调节作用，用限流电阻上压降

的变化补偿电网电压波动和负载变化带来的影响而实现的。因此，这种稳压电路中限流电阻 R 的阻值和稳压管的参数要选配得当。

2．元件选择

在选择电路元件时，应首先知道负载所要求的电压 U_L、最大负载电流 I_{Lmax}。

（1）稳压管的选择。

选择稳压管的一般原则为

$$U_Z = U_L \tag{6-13}$$

$$I_{ZM} = (1.5\sim3)I_{Lmax} \tag{6-14}$$

（2）U_i 的选择。

根据经验，输入电压 U_i 取

$$U_i = (2\sim3)U_L \tag{6-15}$$

（3）限流电阻 R 的选择。

为保证极端状态下电路的正常工作，R 的选择必须满足：①稳压管流过的最小电流应大于稳定电流；②稳压管流过的最大电流应小于最大稳定电流。即

$$\begin{aligned} I_{Zmin} &> I_Z \\ I_{Zmax} &< I_{ZM} \end{aligned} \tag{6-16}$$

当电网电压最低且负载电流最大时，流过稳压管的电流最小，其值应大于稳定电流 I_Z。由此可确定 R 的最大允许值 R_{max}，写成表达式为

$$\frac{U_{imin} - U_Z}{R} - I_{Lmax} > I_Z$$

则

$$R_{max} = \frac{U_{i\,min} - U_Z}{I_{L\,max} + I_Z} \tag{6-17}$$

当电网电压最高且负载电流最小时，流过稳压管的电流最大，其值应小于最大稳定电流 I_{ZM}，由此可确定 R 的最小允许值 R_{min}，写成表达式为

$$\frac{U_{imax} - U_Z}{R} - I_{Lmin} < I_{ZM}$$

则

$$R_{min} = \frac{U_{i\,max} - U_Z}{I_{L\,min} + I_{ZM}} \tag{6-18}$$

如果考虑空载情况，I_{Lmin} 应取零。

例 6.4 在图 6.20 所示的稳压电路中，已知负载电流为 10~20mA，稳压管稳定电压 U_Z=6V，稳定电流 I_Z=5mA，最大稳定电流 I_{ZM}=40mA，试确定（1）输入电压 U_i；（2）限流电阻 R 的取值范围（电网电压的波动为±10%）。

解：（1）确定 U_i。根据式（6-15），有

$U_i=(2\sim3)U_L=(2\sim3)U_Z=(2\sim3)\times6V$

取 U_i=15V。

（2）确定 R 值。当电网电压产生±10%波动时，U_i 也随之产生±10%的波动。则

$$R_{max}=\frac{U_{i\,min}-U_Z}{I_{Lmax}+I_Z}=\frac{0.9\times15-6}{20+5}=300\Omega$$

$$R_{min}=\frac{U_{i\,max}-U_Z}{I_{L\,min}+I_{ZM}}=\frac{1.1\times15-6}{10+40}=210\Omega$$

故 R 的取值范围为 210～300Ω。

硅稳压管稳压电路的优点是电路结构简单，使用元件少，调试方便，但因受稳压管参数的限制，其输出电流较小，输出电压不可调。因此，仅适用于负载电流较小、负载电压不变、稳定性能要求不高的场合。

6.4　应 用 举 例

例 6.5　镍镉电池充电器电路。

图 6.21 所示电路为一种 5 号镍镉电池充电器的电路图。此充电器用来对两节 5 号电池进行充电，起始充电电压约为 2.2V，充电结束后约为 2.5V，充电电流为 50~60mA，充电时间在 14 小时左右。

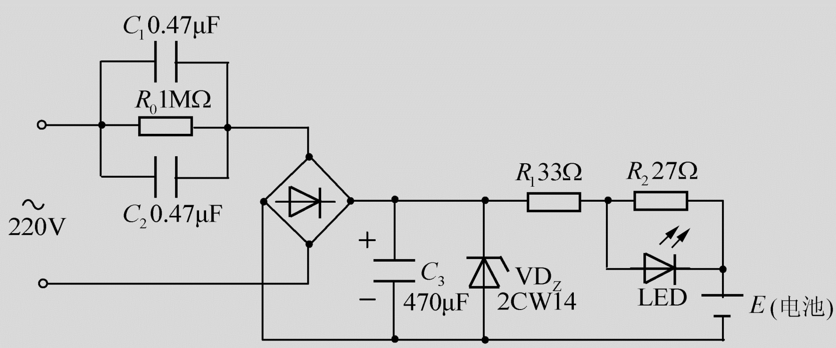


图 6.21　镍镉电池充电器的电路

在图 6.21 中，发光二极管 LED 起充电指示的作用，当电池充满后其亮度将明显变暗，提示用户电已充满，应及时去除电源。

降压部分，由电容 C_1、C_2 和电阻 R_0 构成，利用电容的容抗实现降压。当输入交流电源电压处于正半周时，电源通过电容 C_1、C_2 及桥式整流电路对电容 C_3 充电；当输入交流电源电压处于负半周时，电源仍然可以向 C_3 继续充电。由于 C_3 上的电压远小于电源电压，因此电容降压所能提供的电流约为 $U_i/X_C=2\pi fCU_i$（其中 C 为 C_1、C_2 的并联等效电容），若 C 为 1μF，它能提供 69mA 的电流。扣除稳压管的工作电流后，电路实际能提供给电池的充电电流约为 50～60mA。电阻 R_0 起保护作用，当电源断开后，R_0 将电容 C_1、C_2 上的电荷释放掉，以避免发生触电危险。

稳压部分，全波整流后的直流电压加在电容 C_3 两端，再由稳压管 2CW14 进行稳压，其稳压值约为 7V。注意稳压管不可开路，否则输出的电压将会升至很高，损坏充电电池。

充电部分，电阻 R_1 起限流作用，当充电电流达到 50mA 时，分压电阻 R_2 上的压降恰好可使发光二极管 LED 发光；当电池 E 充满后，其两端电压升高，由于稳压管 VD_Z 起稳压作用，导致电流略有下降，电阻 R_2 上的压降也会下降，使得 LED 显示的亮度明显下降。

例 6.6 趣味电子“蜡烛”。

趣味电子“蜡烛”的电路主要由 220V 交流变换电路及氖泡闪烁电路两部分组成，如图 6.22 所示。

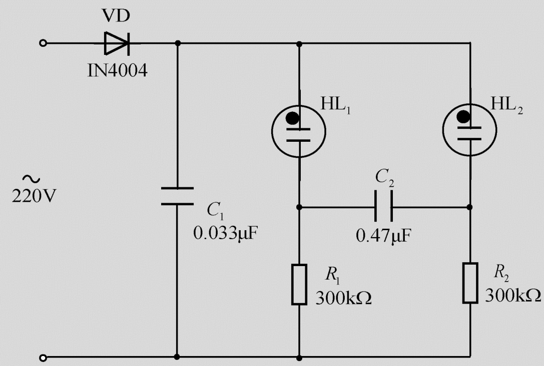


图 6.22　趣味电子“蜡烛”电路

例 6.7 发光式逻辑测试笔电路。

图 6.23 所示是一种逻辑测试笔电路图。电路中利用不同发光二极管显示的颜色，来判断被测电压的正负、高低电平。当探针接触低电平，即零电位时，VT_1 截止，VT_2 饱和导通，发光二极管 V_2 中通过电流，发出黄色光，显示此时电路为“0”状态。当探针输入高电平时，VT_1 导通，发光二极管 V_1 得电发出红色光，显示此时电路为“1”状态。当探针输入负电平时，VT_3 导通，发光二极管 V_3 得电发出绿色光，显示此时电路为“−1”状态。当探针接触正脉冲信号时，V_1 和 V_2 两管发光表明此时是正脉冲序列，V_2 和 V_3 两管交替发光表明此时是负脉冲序列。注意，测试时，夹子需与被测电路的接地端相接。

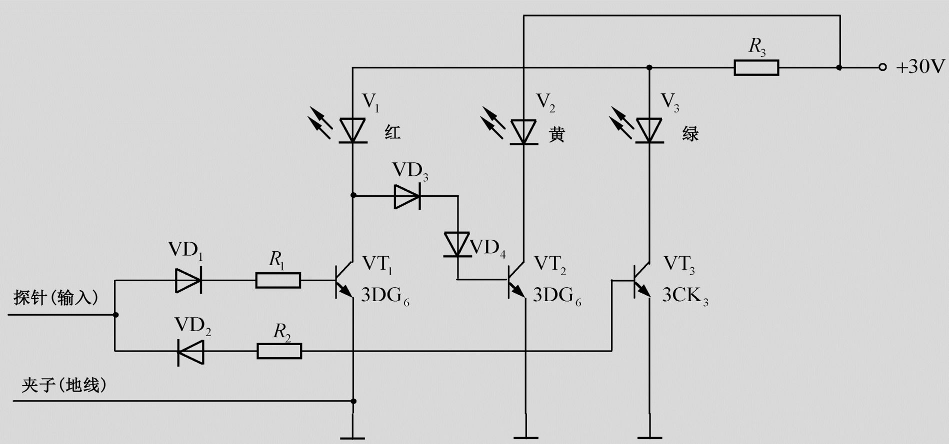


图 6.23　发光式逻辑测试笔电路

本 章 小 结

1．半导体有空穴和自由电子两种载流子参与导电。正是基于这种特点，才提供了利用掺杂提高载流子浓度而改变半导体导电能力的方法。

2．PN 结是半导体二极管和其他半导体器件的构成基础。PN 结具有单向导电性，加正向电压时导通，加反向电压时截止。

3．利用二极管的单向导电性可以组成各种整流电路，本章主要介绍了单相半波和单相桥式整流电路。

4．为减小输出电压的波动，常采用滤波电路。滤波电路种类很多，常用的有电容滤波、电感滤波和复式滤波。

5．在整流滤波的基础上，再接入由稳压管和限流电阻组成的稳压环节，就构成了简单的直流稳压电源。稳压管与普通二极管的不同之处，就是它工作在反向击穿状态下。

习　题　6

6.1　填空题

（1）半导体导电不同于导体导电，在半导体中有______和______两种载流子参与导电。

（2）在本征半导体中掺入__价元素，形成 P 型半导体，其多数载流子是______，少数载流子是___________。

（3）在本征半导体中掺入__价元素，形成 N 型半导体，其多数载流子是______，少数载流子是___________。

（4）杂质半导体中掺杂的目的是为了提高______________。

（5）PN 结正向偏置时______，反向偏置时______。因此 PN 结具有______________。

（6）稳压二极管工作在______________区。

（7）整流电路是利用了二极管的__________性。

（8）电容滤波是将电容_____在整流电路的输出端与负载之间。电感滤波是将电感_______在整流电路与负载之间。

6.2　判断图 6.24 所示各电路中的二极管是处于导通状态，还是截止状态。

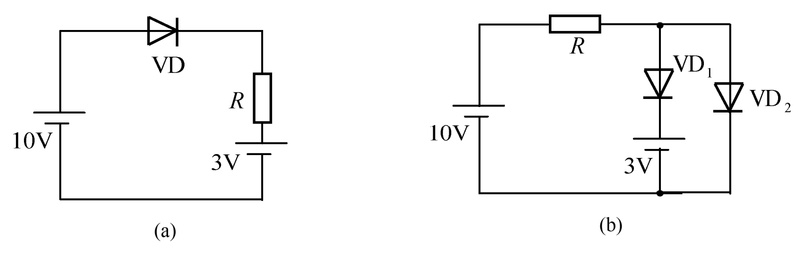


图 6.24　习题 6.2 图

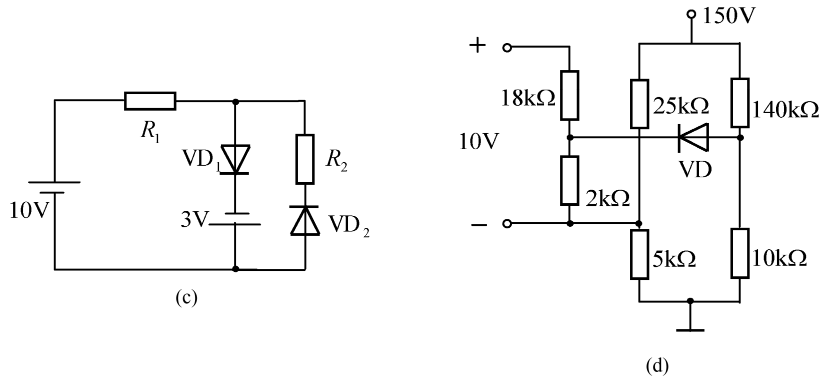


图 6.24　习题 6.2 图（续）

6.3　电路如图 6.25 所示，判断图中二极管是导通还是截止，并求电压 U_o 大小。

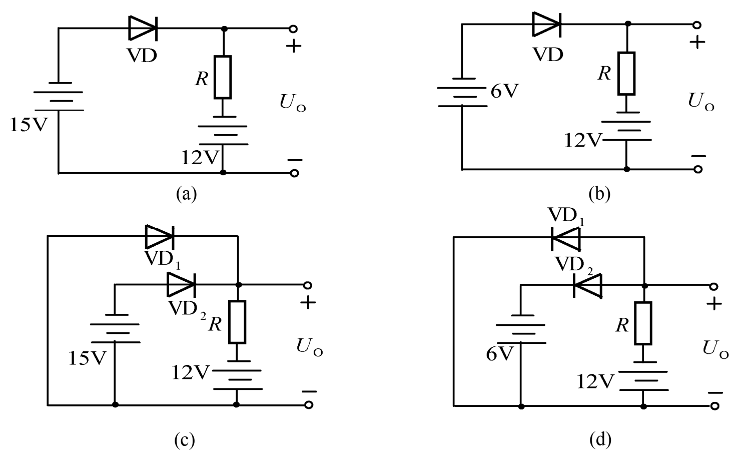


图 6.25　习题 6.3 图

6.4　在题 6.4 图所示的二极管限幅电路中，输入电压均为正弦波，幅值为 $2E$，试画出输出电压 u_o 的波形（R_L>>R）。

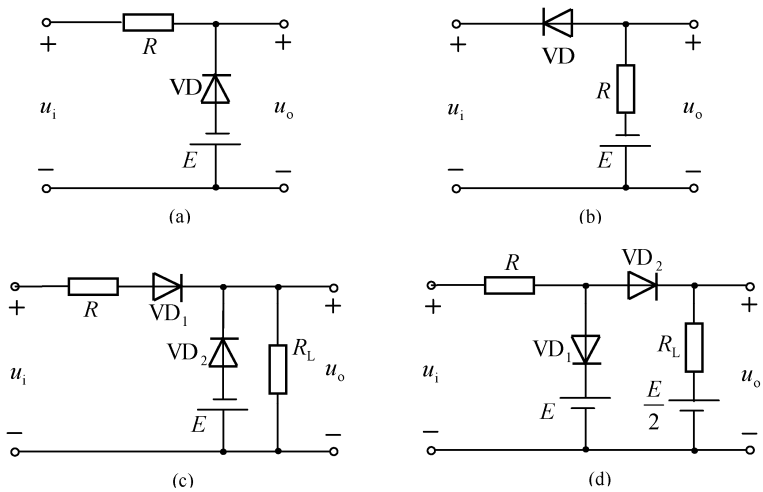


图 6.26　习题 6.4 图

6.5　电路如图 6.27 所示。当（1）V_A=3V，V_B=3V；（2）V_A=3V，V_B=0V；（3）V_A=V_B=0V 时，试求输出端电位 V_F 及各支路中通过的电流。二极管的正向压降忽略不计。

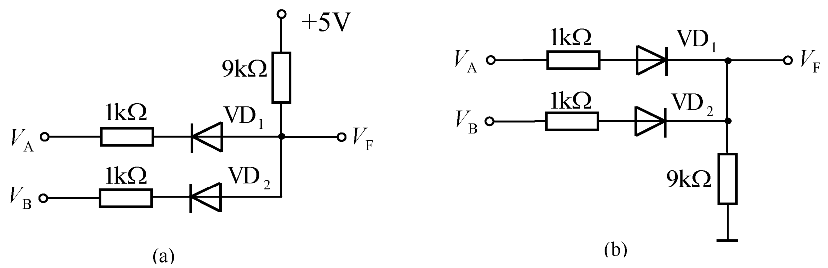


图 6.27　习题 6.5 图

6.6　今要求负载电压 U_L=30V，负载电流 I_L=150mA，采用单相桥式整流电路（带电容滤波器），已知交流频率为 50Hz，试选用管子型号和滤波电容器。

6.7　电路和参数如图 6.28 所示。其中 R_{L1}=100k Ω，R_{L2}=10Ω。试求：

（1）R_{L1}、R_{L2} 两端的电压平均值 U_{L1}、U_{L2} 和电流平均值 I_{L1}、I_{L2}；

（2）流过二极管 VD_1、VD_2、VD_3 的平均电流 I_{D1}、I_{D2}、I_{D3} 及各管所承受的最大反向电压。

6.8　某整流电路如图 6.29 所示。

（1）分析输出电压的大小和极性。

（2）求二极管 VD_1、VD_2 所承受的最大反向电压值；电容器 C_1、C_2 所承受的最大电压值。

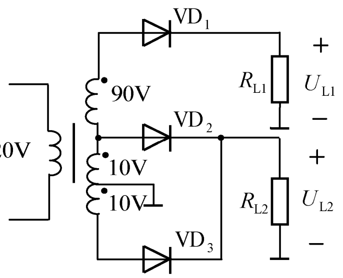


图 6.28　习题 6.7 图

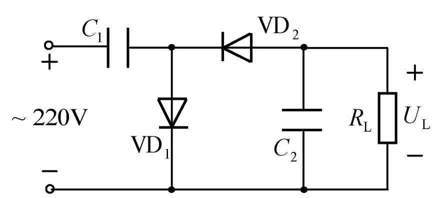


图 6.29　习题 6.8 图

6.9　某稳压电源如图 6.30 所示，试分析：

（1）输出电压的极性、大小如何？

（2）电容器 C_1、C_2 的极性如何？它们的耐压值应选多大？

（3）2CW20 稳定电流 I_Z=5mA，负载电流 I_L 的最大值可能为多少？负载电阻 R_L 的最小值约为多少？

（4）若 VD_Z 的极性接错，会出现什么问题？

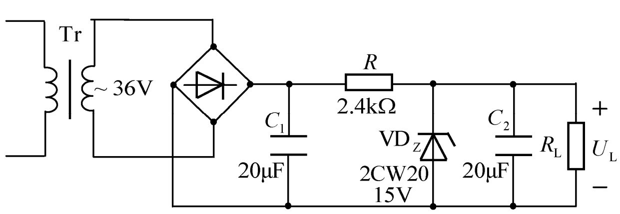


图 6.30　习题 6.9 图

第 7 章　基本放大电路

放大电路是各种精密测量、自动检测及自动控制系统的重要组成部分。放大电路的功能是利用三极管的电流控制作用，把微弱的电信号不失真地放大到所需的数值。本章主要介绍三极管的结构、放大作用和输入输出特性，以及由三极管构成的几种基本放大电路的组成、工作原理与特点、分析方法及应用等。

7.1　晶体三极管

晶体三极管又称半导体三极管，简称晶体管或三极管，因为有电子和空穴两种载流子参与导电，又称双极型三极管，是构成各种电子电路的基本元件，它的放大作用和开关作用在电子技术中得到广泛的应用。其特殊功能是由内、外因两个方面决定的。独特的内部结构，必备的外部条件，缺一不可。

7.1.1　基本结构

三极管是在一块半导体上制成两个 PN 结，再引出三个电极而构成的。按 PN 结组成方式的不同，三极管可分为 PNP 型和 NPN 型两种。按半导体材料的不同，三极管也有锗管和硅管之分，国内生产的硅管多为 NPN 型，锗管多为 PNP 型。图 7.1 所示为三极管的结构示意图及其图形符号。

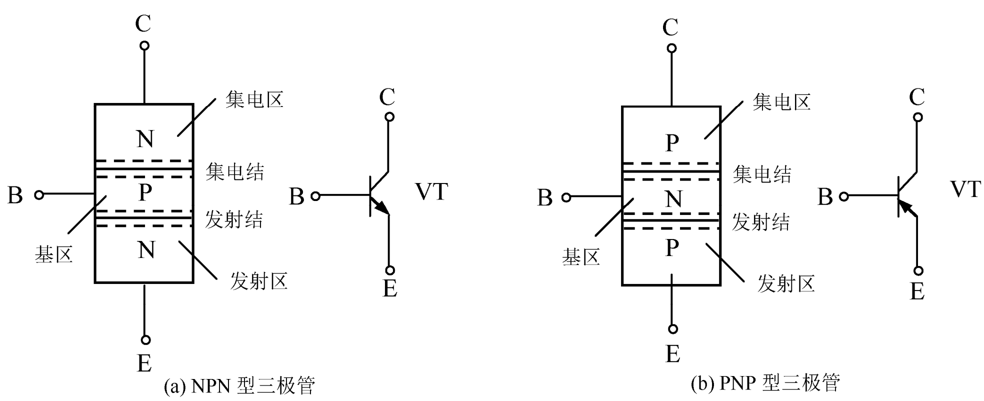


图 7-1　三极管结构示意图和图形符号

三极管有三个导电区域：发射区、基区、集电区；从三个区引出三个电极，分别为发射极 E、基极 B、集电极 C；有两个 PN 结：基区与发射区之间的 PN 结称为发射结，基区与集电区之间的 PN 结称为集电结。发射区的杂质浓度很高，集电区的杂质浓度较低，基区很薄且杂质浓度很低，集电结的面积比发射结的面积大。各区不同的掺杂浓度与厚度、两结面积的区别，组成了三极管的独特结构。

PNP 型和 NPN 型三极管的工作原理相似，其区别是注入基区的载流子不同，因而外加

电压的极性和各电极电流的方向恰好相反。本章以 NPN 型三极管为例进行分析。

7.1.2 电流放大作用及原理

1. 电流放大现象及外部条件

将一个 NPN 型三极管接成如图 7.2 所示的实验电路。要求集电极电源电压 E_C 大于基极电源电压 E_B，以保证发射结正向偏置，集电结反向偏置。

改变基极电阻 R_B，基极电流 I_B 发生变化，集电极电流 I_C 也随之而变。实验测量数据如表 7.1 所示。

从实验数据中可以发现以下规律：

（1）$I_E=I_B+I_C$。

对实验数据的每一列，均有 $I_E=I_B+I_C$。此结果符合基尔霍夫电流定律。

（2）$I_C \approx I_E$。

I_C 和 I_E 远远大于 I_B，所以 $I_C \approx I_E$。

（3）基极电流的微小变化可以引起集电极电流的较大变化。

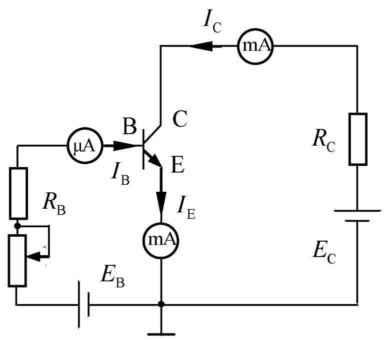


图 7.2 三极管的电流放大作用

由表 7.1 中第三列和第四列数据，可得

$$\frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}=\frac{2.30-1.50}{0.06-0.04}=40$$

这就是三极管的电流放大作用。

（4）三极管具有放大作用时必备的外部条件：发射结必须正向偏置，集电结必须反向偏置。

表 7.1 三极管电路电流测量数据

I_B / mA	0	0.02	0.04	0.06	0.08	0.10
I_C / mA	<0.001	0.70	1.50	2.30	3.10	3.95
I_E / mA	<0.001	0.72	1.54	2.36	3.18	4.05

2. 载流子的运动规律

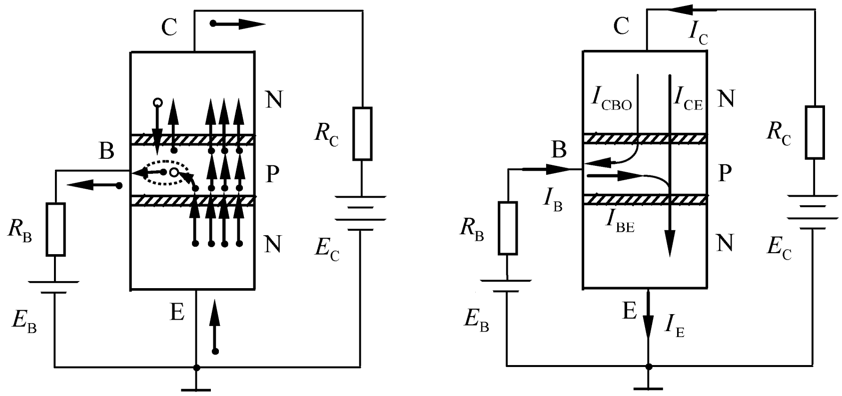
（1）发射区向基区扩散电子。

由于发射结处于正向偏置状态，发射区的多数载流子（自由电子）在正向电压的作用下，不断地越过发射结扩散到基区，同时又不断从电源负极补充电子，因而形成射极电流 I_E，其方向与电子流动方向相反，即从发射极流出，如图 7.3 所示。同时，基区的多数载流子（空穴）在发射结正向电压作用下，也会扩散到发射区，但由于基区杂质浓度很低，这部分空穴所形成的空穴电流很小，可以忽略不计，因此射极电流 I_E 主要是电子电流。

（2）电子在基区的扩散与复合。

发射区的掺杂浓度非常高，大量的自由电子扩散到基区后，在发射结附近浓度最高，而远离发射结的地方浓度低，形成浓度上的差别，于是电子继续向集电结方向扩散。在扩

散过程中，由于基区的掺杂浓度非常低，只有一小部分电子与基区的空穴相遇而复合，同时接在基极的电源 E_B 的阳极不断从基极拉走价电子产生空穴，使基区的空穴浓度基本不变，这样就形成了连续的电流 I_{BE}，其大小约等于基极电流 I_B。高浓度掺杂的发射区扩散的自由电子的绝大部分到达了集电结附近，这是三极管放大作用的主要内部条件。各区的掺杂浓度和结构可控，则三极管的电流放大作用可控。



(a)载流子运动　　　（b）电流分配

图 7.3　载流子的传输过程

（3）集电区收集电子。

由于集电结加了很高的反向偏置电压，从发射区扩散到集电结附近的电子在反向电压作用下穿过集电结为集电区所收集，形成电流 I_{CE}，它基本上等于集电极电流 I_C。

此外，由于集电结反向偏置，集电区的少数载流子空穴和基区的少数载流子电子将发生漂移运动，形成反向饱和电流 I_{CBO}，它的数值很小，相对基极电流 I_B 和集电极电流 I_C，所占比例极小，但受温度影响很大。

3．电流分配关系

根据上述载流子的运动情况可以看出，发射区发射电子的数目等于基区复合的电子数与集电结收集的电子数之和，其外部表现为

$$I_E = I_B + I_C \tag{7-1}$$

在基区中复合的电子数越少，越过集电结被集电区收集的电子数就越多，电流放大作用越强。因此，三极管的电流放大作用取决于电子在基区扩散与复合的比例。从外部看，当发射极电流一定时，基极电流越小，集电极电流越大，电流放大作用越强。通常用电流放大系数来表示三极管的放大能力。集电极电流 I_C 与基极电流 I_B 的比值称为直流电流放大系数，亦称静态电流放大系数，用 $\overline{\beta}$ 表示，即

$$\overline{\beta} = I_C / I_B \tag{7-2}$$

集电极电流的变化量 ΔI_C 与基极电流的变化量 ΔI_B 的比值称为交流电流放大系数，亦称动态电流放大系数，用 β 表示，即

$$\beta = \Delta I_C / \Delta I_B \tag{7-3}$$

在放大状态下，直流电流放大系数和交流电流放大系数相差无几，即 $\overline{\beta} \approx \beta$ 。

7.1.3　特性曲线

三极管的特性曲线是指三极管各极电压与电流之间的关系曲线，它是三极管内部载流子运动规律的外部表现，反映了三极管的外在性能，是分析放大电路的重要依据。最常用的是共射极接法时的输入特性曲线和输出特性曲线。测试电路如图 7.4 所示。

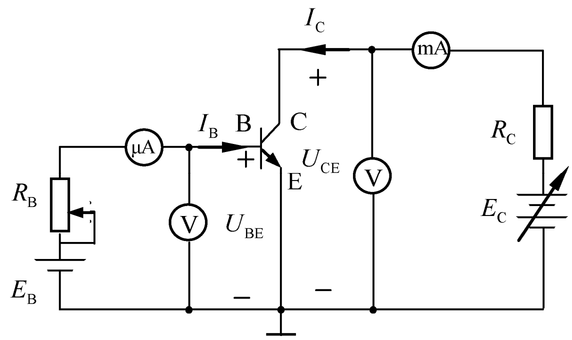


图 7.4　三极管共射特性曲线测试电路

1．输入特性曲线

输入特性是指当集电极与发射极之间的电压 U_{CE} 为一常数时，由基极和发射极构成的输入回路中基极电流 I_B 与基-射极电压 U_{BE} 之间的关系曲线，它反映了三极管输入回路中的电压与电流的关系，其函数表达式为

$$I_B = f(U_{BE})\big|_{U_{CE}=\text{常数}} \qquad (7\text{-}4)$$

三极管的输入特性曲线如图 7.5 所示。

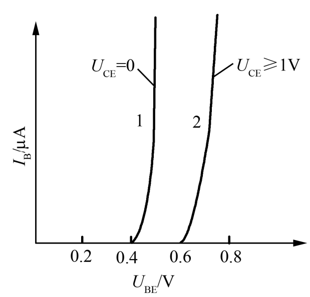


图 7.5　三极管的输入特性曲线（3DG）

U_{CE}=0V 时的输入特性如图 7.5 中的曲线 1 所示。当 U_{CE}=0V 时，即集电极与发射极电位相等，发射结和集电结相当于并联关系，所以输入特性与二极管的正向伏安特性曲线相似。

U_{CE}≥1V 时的输入特性如图 7.5 中的曲线 2 所示。随着 U_{CE} 的增大，从发射区进入基区的电子在集电结外加电场的作用下，将有更多部分到达集电区，导致与基区空穴复合的电子数目减少。因此，要获得同样大小的基极电流 I_B，就必须加大基-射极电压 U_{BE}，使发射区发射更多的电子，所以输入特性曲线右移。

当 U_{CE}>1V 时，由于集电结的电场已经足够强，可以将发射区扩散到基区的电子中的绝大部分拉入集电区，U_{CE} 再增大，被集电区收集的电子数也不会明显增加，即 I_B 不会明显减小。因此，U_{CE}≥1V 以后的输入特性曲线基本重合在一起。

2．输出特性曲线

输出特性曲线是指基极电流 I_B 为某一常数时，集电极电流 I_C 与集-射极电压 U_{CE} 之间

的关系曲线，即

$$I_C = f(U_{CE})\Big|_{I_B=\text{常数}} \qquad (7\text{-}5)$$

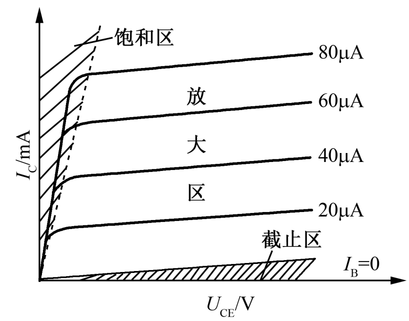


图 7.6　三极管的输出特性曲线

输出特性反映了三极管输出回路中电压与电流的关系。对应于某一个 I_B，就有一条输出特性曲线，故输出特性是一族曲线，如图 7.6 所示。

根据三极管工作状态的不同，输出特性可分为三个区域：

（1）放大区。

输出特性曲线的近于水平部分的线性区域称为放大区。在该区域内，三极管的发射结正向偏置，集电结反向偏置，集电极电流 I_C 几乎仅取决于基极电流 I_B，即 $I_C=\overline{\beta}I_B$，而与 U_{CE} 无关，表现出三极管的电流放大作用。

（2）截止区。

I_B=0 的曲线以下的区域称为截止区。此时发射结和集电结均处于反向偏置状态。I_C 近似为零（I_C 等于穿透电流 I_{CEO}），U_{BE} 小于死区电压。

（3）饱和区。

在输出特性曲线中靠近纵轴的区域，各条特性曲线十分密集，这部分称为饱和区。此时，发射结和集电结均处于正向偏置状态，I_C 不受 I_B 的控制，三极管失去电流放大作用。

对于小功率管，一般认为 $U_{CE}=U_{BE}$ 时达到临界饱和状态，当 $U_{CE}<U_{BE}$ 时称为饱和，通常用 U_{CES} 来表示饱和时的管压降。一般小功率硅管的 U_{CES} 小于 0.4V，锗管小于 0.2V。

7.1.4　主要参数

1．电流放大系数

电流放大系数是反映三极管电流放大能力的一个基本参数，包括直流电流放大系数和交流电流放大系数。

（1）直流电流放大系数。

直流电流放大系数是指无输入信号时，在同一个集电极电压 U_{CE} 下，集电极电流 I_C 与基极电流 I_B 的比值，即

$$\overline{\beta} = \frac{I_C}{I_B}$$

（2）交流电流放大系数。

交流电流放大系数是指有输入信号时，在同一个集电极电压 U_{CE} 下，集电极电流变化量 ΔI_C 与基极电流变化量 ΔI_B 的比值，即

$$\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$$

$\overline{\beta}$ 与 β 含义不同，但在输出特性曲线近于平行等距的情况下，二者相差不大，近似估算时，常取 $\beta=\overline{\beta}$。

2．反向饱和电流

（1）集电极反向饱和电流 I_{CBO}。

当发射极开路时，在基极与集电极之间加一定的反向电压，少数载流子将形成反向漂移电流，称为集电极反向饱和电流 I_{CBO}，其测量电路如图 7.7 所示。I_{CBO} 的大小标志着集电结质量的好坏，其值越小越好。I_{CBO} 随温度的升高而增加。

（2）穿透电流 I_{CEO}。

I_{CEO} 是指当基极开路时，集电极与发射极之间加反向电压，由集电区穿过基区流入发射区的电流。测量电路如图 7.8 所示。

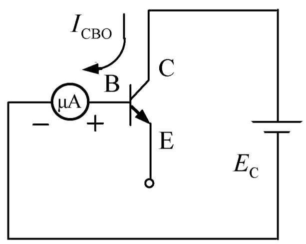


图 7.7　I_{CBO} 测量电路

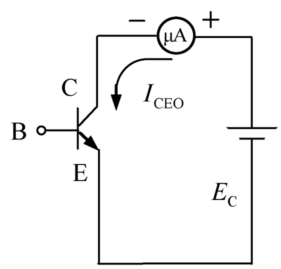


图 7.8　I_{CEO} 测量电路

根据三极管的电流分配关系，从发射区扩散到达集电区的电子数，应等于 I_{CBO} 的 $\overline{\beta}$ 倍，如图 7.9 所示，故有

$$I_{CEO} = \overline{\beta} I_{CBO} + I_{CBO} = (1+\overline{\beta}) I_{CBO} \tag{7-6}$$

三极管的 I_{CBO}、$\overline{\beta}$ 越大，I_{CEO} 越大，三极管的热稳定性就越差。因此，在选用三极管时，I_{CBO} 越小越好，而 $\overline{\beta}$ 值的选择在考虑放大能力的前提下，以适中为宜。

3．极限参数

（1）集电极最大允许电流 I_{CM}。

集电极电流增大到一定程度时，β 将显著下降。这时管子虽不至于被烧毁，但放大能力太差，应予避免。故规定 β 下降到额定值的三分之二时所对应的集电极电流为最大允许电流 I_{CM}。一般小功率管 I_{CM} 为几十毫安；大功率管为几安以上。

（2）集电极最大允许耗散功率 P_{CM}。

集电结上允许的最大功率损耗称为集电极最大允许耗散功率 P_{CM}。在安全工作情况下，集电极耗散功率 P_C 应满足

$$P_C = I_C U_{CE} \leqslant P_{CM} \tag{7-7}$$

可在输出特性上画出管子的允许功率耗散线。

（3）反向击穿电压 $U_{(BR)CEO}$。

基极开路时，加在集电极和发射极之间的最大允许电压，称为集-射极反向击穿电压 $U_{(BR)CEO}$。当 $U_{CE}>U_{(BR)CEO}$ 时，I_{CEO} 将大幅度上升，管子将被击穿。

由极限参数 I_{CM}、P_{CM}、$U_{(BR)CEO}$ 在输出特性上共同确定的三极管的安全工作区如图 7.10 所示。

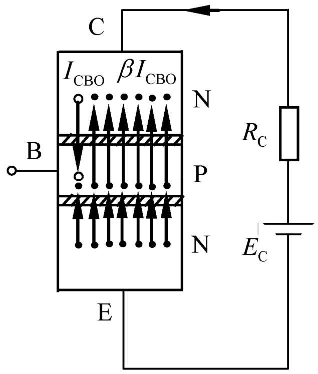


图 7.9　电流分配关系

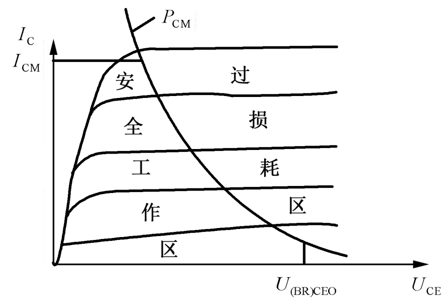


图 7.10　三极管功率耗散线

7.2　基本交流放大电路

7.2.1　基本交流放大电路的组成

1．放大电路的基本工作情况

三极管的主要用途之一是利用其电流放大作用组成放大电路。图 7.11 是由 NPN 型三极管组成的基本交流放大电路，因输入信号 u_i 与输出信号 u_o 的公共端为发射极，故称为共射极基本放大电路。输入信号 u_i 从电路的 A_1、O 两点输入（称为放大器的输入端），放大器的输出电压 u_o 从 A_2、O 两端输出（称为放大器的输出端）。输入信号 u_i 通过电容 C_1 加在三极管的基极，从而引起基极电流 i_B 的相应变化，i_B 的变化使集电极电流 i_C 随之变化。集电极电压 $u_{CE}=E_C-i_CR_C$，i_C 瞬时值的增加导致 u_{CE} 减小，所以 u_{CE} 的变化趋势恰好与 i_C 相反。u_{CE} 中的变化量经过耦合电容 C_2 传送到输出端成为输出电压 u_o。对应的电流、电压波形示于图 7.11 中。

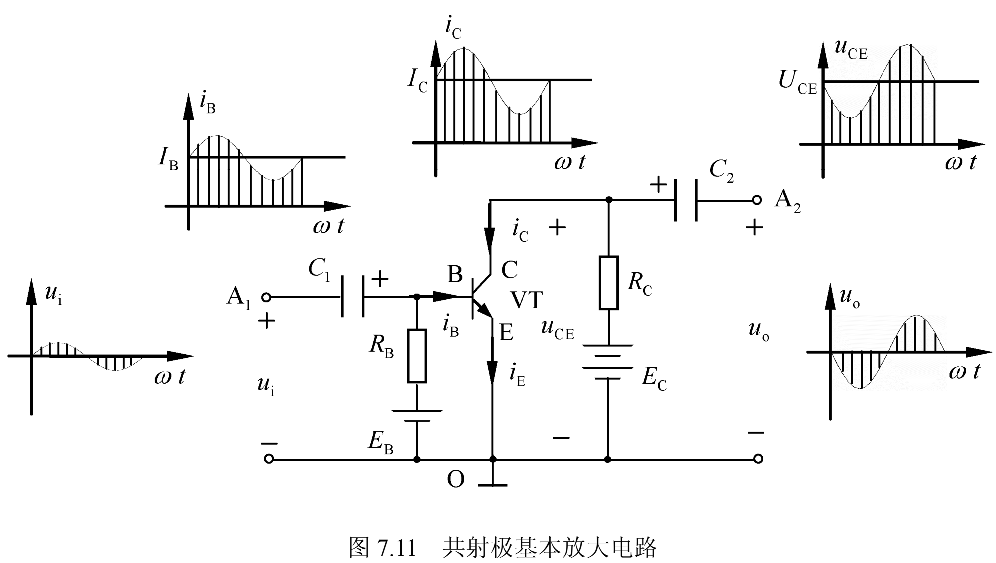


图 7.11　共射极基本放大电路

由于交、直流信号同时存在，为区分各种信号的电流、电压，约定如下：

（1）直流信号用大写字母、大写下标表示，如 I_B、U_{CE}；

（2）交流信号用小写字母、小写下标表示，如 i_b、u_{ce}；

（3）交、直流叠加的信号用小写字母、大写下标表示，如 i_B、u_{CE}。

2．放大电路的组成原则

要使放大电路具有放大作用，必须遵循以下原则：

（1）直流电源的选择要能够设置合适的静态工作点，并作为输出的能源。对于晶体三极管放大电路，电源的极性和大小应使三极管基极与发射极之间处于正向偏置，而集电极与基极之间处于反向偏置，即保证晶体管工作在放大区。

（2）电阻取值得当，与电源配合，使放大管有合适的静态工作电流。

（3）输入信号必须能够作用于放大管的输入回路。

（4）当负载接入时，必须保证放大管输出回路的动态电流能够作用于负载，从而使负载获得比输入信号大得多的信号电流或信号电压。

3．放大电路的组成元件及其作用

（1）晶体三极管 VT。

三极管是整个放大电路的核心元件，工作在放大状态，起电流放大作用，将从输入端输入的微弱信号加以放大，在输出端得到放大的输出信号。

（2）集电极电源 E_C。

E_C 是放大电路的能源提供者，同时为集电结提供一个反向偏置电压，以保证三极管工作在放大状态。因为能量是守衡的，放大元件本身并不能把能量放大，而是直流电源 E_C 的负极源源不断地为发射区提供电子，才能形成三极管中载流子连续不断的定向运动。三极管的真正作用是利用基极电流 I_B 对集电极电流 I_C 的控制关系，实现控制电源供给能量的目的。E_C 一般为几伏到几十伏。

（3）集电极负载电阻 R_C。

R_C 的主要作用是将放大的集电极电流信号转化为电压信号输出，以实现电压放大。R_C 的阻值一般为几千欧到几十千欧。

（4）基极电源 E_B 和基极偏置电阻 R_B。

E_B 和 R_B 组成基极偏置电路，为三极管的发射结提供正向偏置电压。输入端未加输入信号时的电路工作状态称为静态，静态时的基极电流又称偏置电流，简称偏流。基极电阻 R_B 的作用是获得合适的偏流以保证三极管工作在放大状态。偏置电流 I_B 与偏置电压 E_B、偏置电阻 R_B 的关系为

$$I_B = \frac{E_B - U_{BE}}{R_B} \qquad (7\text{-}8)$$

U_{BE} 为三极管发射结的电压，通常硅管取 U_{BE} =0.7V，锗管取 U_{BE} =0.2V。E_B 一般在几伏到几十伏范围内，R_B 一般为几十千欧到几百千欧。R_B、E_B 一经确定，偏流 I_B 也就固定了，因此图 7.11 所示的放大电路又称固定偏置放大电路。

（5）耦合电容 C_1 和 C_2。

电容器 C_1 和 C_2 称为耦合电容，其作用是隔直传交。一方面，它可以使交流信号畅通无阻地通过，沟通信号源、放大器及负载之间的交流通路；另一方面，隔断信号源、放大器、负载之间的直流联系，以免互相影响而改变各自的工作状态。C_1、C_2 的容量应取得足够大，一般为几微法到几十微法，通常采用电解电容。由于电解电容两个接线端极性不同，因而连接时必须注意极性，应使电解电容的正极与直流电压的高电位端相连，负极与低电位端相连。

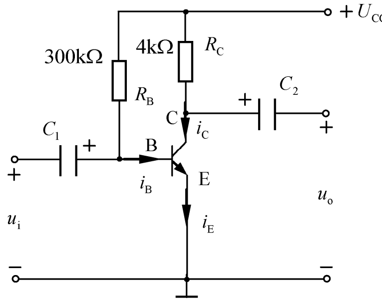


图 7.12　共射极放大电路简化图

在实际应用中，通常将基极和集电极两个电源合并成一个，同时为了简化电路的画法，只标出其对地的电压值和极性，用 U_{CC} 表示，如图 7.12 所示。

7.2.2　放大电路的静态分析

静态时，在三极管的输入、输出特性上对应的工作点称为静态工作点。静态分析的目的是确定放大电路的静态工作点。静态工作点对放大电路的放大倍数、波形质量和管耗等都有影响。设置静态工作点的目的，就是为了将三极管预置在放大区，并保证在叠加了输入信号后仍工作在放大状态。

对放大电路进行分析通常采用图解分析法或近似计算法。图解法可以形象直观地分析和理解放大电路的信号放大过程，而近似计算法则更迅捷、简便。

1. 图解分析法

利用图解分析法进行放大电路的静态分析就是利用管子的输入和输出特性曲线，通过作图的方法来分析放大电路在静态时的情况，即求解静态工作点。

（1）直流负载线。

分析静态工作点时，必须按直流通路考虑。由于电容 C_1、C_2 对于直流信号相当于开路，所以图 7.12 所示放大电路的对应直流通路如图 7.13 所示。

三极管是非线性元件，其集电极电流 I_C 与集-射极电压 U_{CE} 之间不是直线关系，I_C 与 U_{CE} 的关系即三极管的输出特性，如图 7.14 所示。

根据直流通路，可列出输出回路电压方程

$$U_{CE} = U_{CC} - I_C R_C \tag{7-9}$$

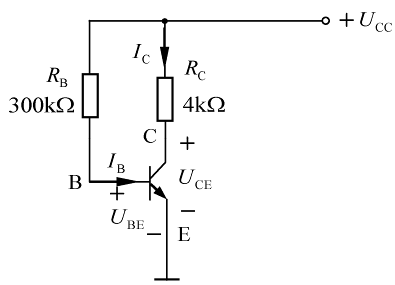


图 7.13　直流通路图

则

$$I_C = -\frac{1}{R_C}U_{CE} + \frac{U_{CC}}{R_C} \tag{7-10}$$

这是一个直线方程，其斜率为 $k = \tan\alpha = -1/R_C$，取决于集电极电阻 R_C。该直线在横轴上的截距为 U_{CC}，在纵轴上的截距为 U_{CC}/R_C。因为它由直流通路得出，且与集电极负载电阻 R_C 有关，故称为直流负

载线，如图 7.14（b）中直线 *MN* 所示。

（2）静态工作点。

在输入特性上，只要由电路结构求得偏流 I_B，即可找出如图 7.14（a）所示确定的静态工作点 *Q*，并求出 U_{BE}。

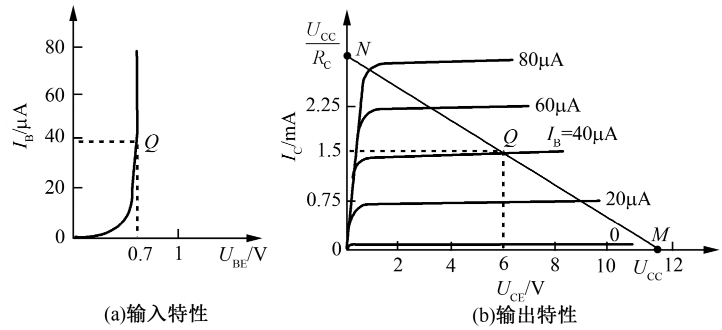


图 7.14　图解法确定静态工作点

由于三极管串联在输出回路中，故 I_C 与 U_{CE} 的值既要满足管子的输出特性，又要满足回路的电压方程，因而只能工作在输出特性曲线与直流负载线的交点上。由交点可确定 I_C 和 U_{CE}。可见，求静态工作点实际就是要确定 I_B、U_{BE}、I_C 和 U_{CE} 这四个静态值。

综上可归纳出图解法分析静态工作点的一般步骤：

①给出三极管的输出特性曲线；

②作直流负载线；

③由直流通路求出偏流 I_B；

④由 I_B 对应的输出特性与直流负载线的交点得出静态工作点 *Q*；

⑤找出对应 *Q* 点的静态值 I_B 、I_C 、U_{CE}。

例 7-1 在图 7-12 所示的放大电路中，已知 E_C =12V，R_C=4kΩ，R_B=300kΩ，晶体管的特性曲线如图 7-14 所示。试求：

（1）作直流负载线；

（2）求静态工作点。

解：（1）根据图 7-13 所示的直流通路，可列出直流负载线方程

$$U_{CE} = U_{CC} - I_C R_C$$

当 I_C=0 时，U_{CE}=U_{CC}=12V，在输出特性的坐标平面的 U_{CE} 轴上得到 *M* 点；当 U_{CE}=0 时，I_C=U_{CC}/R_C=12/4=3mA，在输出特性的坐标平面的 I_C 轴上得到 *N* 点。连接 *M*、*N* 两点，即可得直流负载线。

（2）由输入特性曲线可求得 U_{BE}=0.7V，根据直流通路可得

$$I_B = \frac{U_{CC} - U_{BE}}{R_B} = \frac{12-0.7}{300} \approx 0.04\text{mA} = 40\mu\text{A}$$

I_B=40μA 的这条输出特性与直流负载线的交点即为静态工作点 *Q*。从图 7-14（b）中可求其对应的静态值为

I_C=1.5mA

U_{CE}=6V

2．近似计算法

放大电路的另一种分析方法就是近似计算法。近似计算法是在一定的条件下，忽略一些次要因素，用近似公式计算出结果。它比图解法更迅捷、更简便。

计算静态工作点时，只考虑直流通路，如图 7.13 所示，静态工作点可确定如下：

$$I_{\mathrm{B}}=\frac{U_{\mathrm{CC}}-U_{\mathrm{BE}}}{R_{\mathrm{B}}} \tag{7-11}$$

$$I_{\mathrm{C}}=\beta I_{\mathrm{B}} \tag{7-12}$$

$$U_{\mathrm{CE}}=U_{\mathrm{CC}}-I_{\mathrm{C}}R_{\mathrm{C}} \tag{7-13}$$

并取硅管 U_{BE} 约为 0.7V，锗管约为 0.2V。

7.2.3　放大电路的动态分析

输入端加上输入信号时放大电路的工作状态称为动态。进行动态分析的目的是在给定电路参数和输入信号的情况下，确定电路的电压放大倍数等动态参数，研究交流信号的传输情况。动态分析的方法有图解法、近似计算法。

1．图解分析法

（1）基本方法。

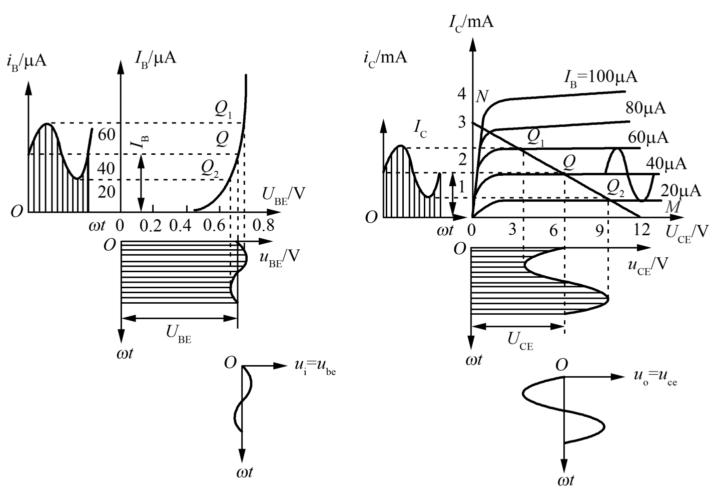
利用图解法对放大电路进行动态分析的步骤如下。

① 根据输入电压 u_{i} 的变化在输入特性上求基极电流 i_{B} 的变化。

设输入电压 $u_{\mathrm{i}}=0.02\sin\omega t$V，它叠加在正向偏置电压 U_{BE} 上，如图 7.15 所示。从输入特性上作出相应的基极电流 i_{b} 的波形，它叠加在直流量 I_{B} 上，在 60～20μA 之间变动，即

$$i_{\mathrm{B}}=I_{\mathrm{B}}+i_{\mathrm{b}} \tag{7-14}$$

i_{b} 为相应于输入电压 u_{i} 的基极交流电流。当工作在输入特性的近似线性部分时，i_{b} 的波形与 u_{i} 近似，即 i_{b} 是与 u_{i} 同频率的正弦量，如图 7.15（a）所示。



(a)i_{B}、u_{BE}　　　　(b)i_{C}、u_{CE}

图 7.15　图解法分析动态工作情况

② 根据 i_B 在输出特性上求 i_C 和 u_{CE}。

当 i_B 在 60μA 与 20μA 之间变动时，直流负载线与输出特性的交点也会随之而变，对应于 i_B=60μA 的一条输出特性与直流负载线的交点是 Q_1 点，对应于 i_B=20μA 的一条输出特性与直流负载线的交点是 Q_2 点。当 u_i 按正弦规律变化时，放大电路的工作点随着 i_B 的变动将沿着直流负载线在 Q_1 与 Q_2 之间移动。放大电路的工作过程就是工作点沿着负载线上下移动的过程。因此，可以相应作出 i_C 与 u_{CE} 的波形，如图 7.15（b）所示。

由图 7.15 的波形可以看出，共射极放大电路的交流输出电压 u_o 恰好与输入信号 u_i 相位相反。这是共射极放大电路的一个重要特点，称为放大器的倒相作用。造成倒相的原因，是由于 u_i 增加时，i_C 是增加的，而 u_{CE} 的变化趋势与 i_C 变化趋势相反，即随 i_C 的增加而减小。

③ 根据图解结果计算电压放大倍数。

由于放大是针对变化量而言的，因此计算电压放大倍数时要用变化量来计算，在交流放大电路中，电压放大倍数定义为放大器的输出电压与输入电压的相量之比，即

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = A_u \angle \varphi \tag{7-15}$$

其中：

$$A_u = \frac{U_o}{U_i} \qquad \varphi = \varphi_o - \varphi_i \tag{7-16}$$

对于共射极固定偏置放大电路，输入、输出电压反相，即相位相差 180°，所以其电压放大倍数是个负数。放大倍数的大小表征了放大器放大信号的能力。

（2）交流负载线。

以上讨论是在输出端开路的情况下进行的。放大器工作时总是带有一定的负载，带载工作的放大电路的工作情况与输出端开路时的工作情况会有所不同。放大器的负载可用等效阻抗来代替。为讨论方便，设输出端接纯电阻负载 R_L，如图 7.16（a）所示。

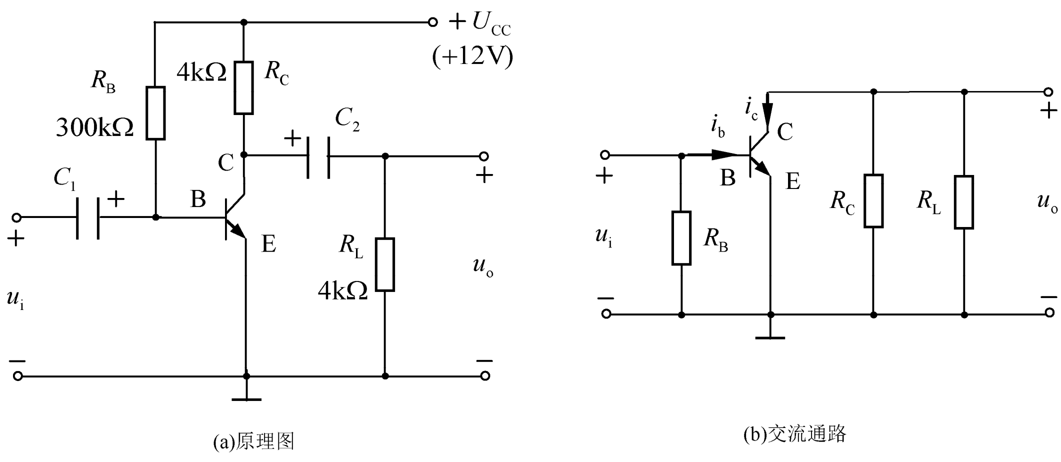


图 7.16　有载共射极放大电路

为了便于分析交流信号的传递情况，画出放大电路的交流通路如图 7.16（b）所示。画交流通路的原则是：原理图中的耦合电容 C_1、C_2 均看作短路；电源 U_{CC} 的内阻很小，所引起的交流压降近似为零，也看作短路。

由图 7.16（b）可见，集电极电流中的交流分量 i_c 不仅流过 R_C，也流过 R_L。这样，在输出回路中 R_C 和 R_L 是并联的，它们的并联等效电阻叫作放大器的交流负载电阻 R_L'，即

$$R_L' = R_C // R_L = \frac{R_C R_L}{R_C + R_L} \tag{7-17}$$

对应图 7.16 中的数据，可知 $R_L' = 4 // 4 = 2\text{k}\Omega$。

因此，当 i_c 按正弦变化时，u_{CE} 并不沿直流负载线变化，而是沿斜率 $-1/R_L'$ 的直线变化。由交流通路决定的这条斜率为 $-1/R_L'$ 的直线，称为交流负载线。当放大器不带负载 R_L 时，交流负载线与直流负载线是重合的。

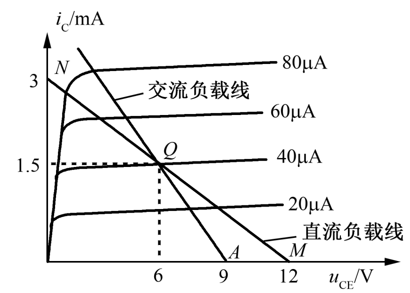


图 7.17　交流负载线

因为输入电压 u_i 在从正半周到负半周的交变过程中一定经过零点，此刻 u_i=0，与静态工作情况相符，所以交流负载线必定通过静态工作点 Q。因此，通过静态工作点 Q 作斜率为 $-1/R_L'$ 的直线，即可得到交流负载线，如图 7.17 中直线 QA 所示。

注意，由于交流负载线比较陡，为了作图方便，一般把交流负载线的方程写成以 i_C 为变量，u_{CE} 为函数形式，即

$$u_{CE} = -R_L' i_C + u_{CEO} \tag{7-18}$$

其中 u_{CEO} 为交流负载线在 u_{CE} 轴上的截距。

图 7.16 所示电路的 $R_L' = 2\text{k}\Omega$，静态工作点对应的值为 I_C=1.5mA，U_{CE}=6V。代入式（7-18）得 u_{CEO}=9V，即交流负载线与 u_{CE} 轴交于点 A（0，9）。连接 QA，即得交流负载线。

直流负载线和交流负载线是从不同角度来反映同一电路内电流电压的变化规律的。直流负载线是反映静态时电压、电流的变化关系，所以主要用来确定静态工作点 Q；而交流负载线所反映的是动态时电压、电流的变化关系，它与输出特性一起决定动态时 i_C 和 u_{CE} 的变化情况，即由 i_B 画 i_C、u_{CE} 的波形时要按交流负载线画出。由于 $R_L'<R_C$，交流负载线的斜率比直流负载线的斜率的绝对值更大，交流负载线更陡，在相同的输入电压下，接负载后的输出电压 u_o 的幅值将减小，放大倍数下降。R_L 减小，交流负载线越陡，放大倍数下降越多。

（3）非线性失真分析。

放大电路的输出电压波形与静态工作点有着密切的关系。当放大电路的静态工作点选择不合适时，输出电压由于三极管的非线性，会产生与输入电压不一致的波形，即发生非线性失真。用图解法可以分析产生波形失真的原因并找出减小波形失真的方法。

在前述的例子中，静态工作点电流 I_B=40μA，Q 点的位置比较合适。i_B 在 20～60μA 的变化范围内时，工作点在线性范围内沿着负载线上、下移动，输出电压波形基本是正弦的，

没有失真。

如果把静态工作点调低，如图 7.18 中的 Q_1 点，在输入电压的负半周的一部分时间内，三极管进入特性曲线的截止区，输出电压的顶部被削去而形成失真，称为截止失真。

若把静态工作点选在 Q_2 点，在输入信号的正半周的一部分时间内，三极管进入特性曲线的饱和区，输出电压的底部被削去而形成失真，称为饱和失真。

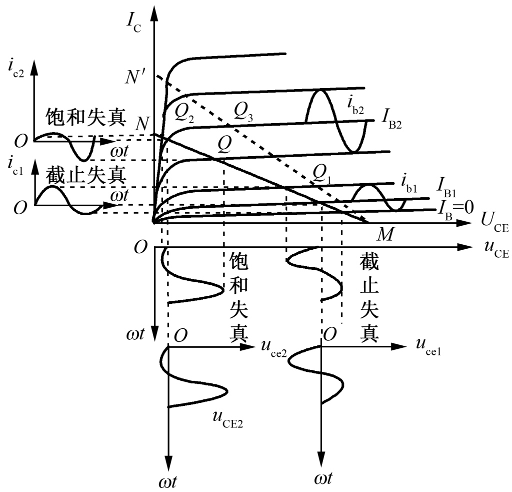


图 7.18　非线性失真

可见，要使信号不产生失真，必须合理设置静态工作点，尽可能将 Q 点设置在负载线的中点位置。通常采用改变 R_B 的办法改变静态工作点。

当输入、输出信号幅度都不太大时，可以在不失真的前提下，把工作点选得低一些，以减小电路的能量损耗。

2．近似计算法

动态分析的近似计算法就是定量分析放大电路的性能指标。近似计算法比图解法更简便迅捷，在实际工程中得到普遍采用。本书避开微变等效法及受控源模型的概念，采用等效电阻的基本概念解决近似计算问题。

（1）电压放大倍数。

图 7.16（b）中，在输入电压 u_i 作用下，基极产生一个交流电流 i_b。因而可以把管子的输入回路 B、E 之间用一个等效电阻 r_{be} 表示，其物理意义为 $r_{be}=u_{be}/i_b$，如图 7.19 所示。工程上，对于低频小功率管的输入电阻常采用下式进行估算

$$r_{be}=300+(1+\beta)\frac{26(\text{mV})}{I_E(\text{mA})}(\Omega) \tag{7-19}$$

式中 I_E 为静态射极电流。r_{be} 的大小为几百欧至几千欧。

由于 $\dot{U}_i=\dot{I}_b r_{be}$，$\dot{U}_o=-\dot{I}_c R_L'$，所以可求得电压放大倍数

$$\dot{A}_u=\frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i}=\frac{-\beta\dot{I}_b R_L'}{\dot{I}_b r_{be}}=-\beta\frac{R_L'}{r_{be}} \tag{7-20}$$

式中负号表明 u_o 与 u_i 反相。

（2）输入电阻 r_i。

输入电阻和输出电阻是衡量放大电路质量好坏的重要指标。

放大电路相对于信号源或前级放大电路来说是一个负载，可用一个电阻来等效代替，这个电阻就是从放大电路的输入端看进去的等效电阻，如图 7.20 所示，称为放大电路的输入电阻，定义为放大电路的输入电压与输入电流的比值，即

$$r_i = \frac{\dot{U}_i}{\dot{I}_i} \tag{7-21}$$

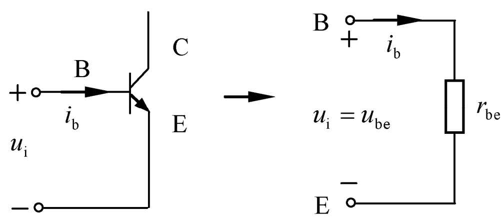


图 7.19　三极管动态输入电阻示意图

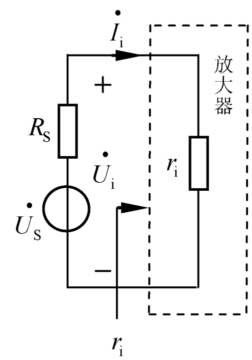


图 7.20　放大电路的输入电阻

由于信号源存在一定的内阻 R_S，r_i 将引起实际加到放大电路的输入电压 $\dot{U}_i$ 的减小。r_i 越小，信号源负担越重。另一方面，由于后级放大电路的输入电阻即前级放大电路的负载电阻，因此，后级的 r_i 较小将会降低前级放大电路的电压放大倍数。因此，通常希望放大电路的输入电阻能高一些。

利用交流通路不难求出输入电阻 r_i 的值。如图 7.16（b）中，从放大电路输入端看进去，其输入电阻显然是 R_B 与 r_{be} 二者的并联，即

$$r_i = R_B // r_{be} \approx r_{be} \tag{7-22}$$

实际电路的 R_B 比 r_{be} 大得多，因此这类放大电路的输入电阻 r_i 近似等于三极管的动态输入电阻 r_{be}。

（3）输出电阻 r_o。

放大电路相对于负载或后级放大电路是一个信号源。这个信号源的内阻称为放大电路的输出电阻 r_o，即从放大电路的输出端看进去的等效电阻。由图 7.21 可知

$$\dot{U}_o = \frac{R_L}{R_L + r_o} \dot{U}'_o \tag{7-23}$$

则

$$r_o = \left[\frac{\dot{U}'_o}{\dot{U}_o} - 1 \right] R_L \tag{7-24}$$

式中，$\dot{U}'_o$ 是放大器不带负载时的输出电压。

输出电阻的大小反映了放大电路带负载的能力。r_o 较大时，放大电路的带负载能力较

差。因此，通常希望放大电路输出级的输出电阻低一些。

利用图 7.16（b）的交流通路可确定 r_o 的值，显然，从输出端看进去的等效电阻为

$$r_o = R_C // r_{ce} \tag{7-25}$$

r_{ce} 为晶体管的动态输出电阻，$r_{ce} = \dfrac{\Delta U_{CE}}{\Delta I_C}$，可以从三极管的输出特性上求得。由于集电结是反向偏置，使得 r_{ce} 的阻值很大，比 R_C 大得多，因此

$$r_o \approx R_C \tag{7-26}$$

例 7.2 图 7.16 所示放大电路中，如果 U_{CC}=12V，R_B=300kΩ，R_C=4kΩ，β=40，试求：

（1）电路能否正常放大？

（2）$R_L=\infty$ 和 R_L=4kΩ时的电压放大倍数 $\dot{A}_{u1}$、$\dot{A}_{u2}$。

（3）电路的输入电阻 r_i 和输出电阻 r_o。

（4）若输出电压波形为顶部失真，试问电路出现了什么失真？如何消除？

解：（1）估算静态工作点 Q。

图 7.16 所示放大电路的直流通路如图 7.21 所示，由此可计算出静态工作点为

$$I_B = \frac{U_{CC} - U_{BE}}{R_B} \approx \frac{U_{CC}}{R_B} = \frac{12}{300} \approx 0.04\text{mA} = 40\mu\text{A}$$

$$I_C = \beta I_B = 40 \times 0.04 = 1.6\text{mA}$$

$$U_{CE} = U_{CC} - I_C R_C = 12 - 1.6 \times 4 = 5.6\text{V}$$

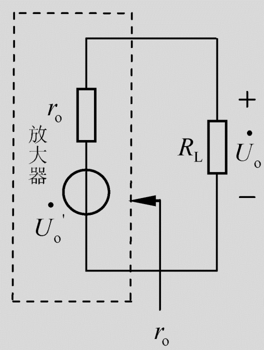


图 7.21　放大电路的输出电阻

由此可知 Q 点合适，电路能够正常放大。

（2）求电压放大倍数。

三极管输入电阻为

$$r_{be} = 300 + (1+\beta)\frac{26}{I_E} = 300 + (1+40) \times \frac{26}{1.6} = 966\Omega$$

当 $R_L=\infty$ 时

$$\dot{A}_{u1} = -\beta \frac{R_C}{r_{be}} = -40 \times \frac{4}{0.966} = -166$$

当 R_L=4kΩ时

$$\dot{A}_{u2} = -\beta \frac{R_L // R_C}{r_{be}} = -40 \times \frac{4//4}{0.966} = -83$$

（3）求 r_i 和 r_o。

$$r_i = R_B // r_{be} \approx r_{be} = 0.966\text{k}\Omega$$

$$r_o \approx R_C = 4\text{k}\Omega$$

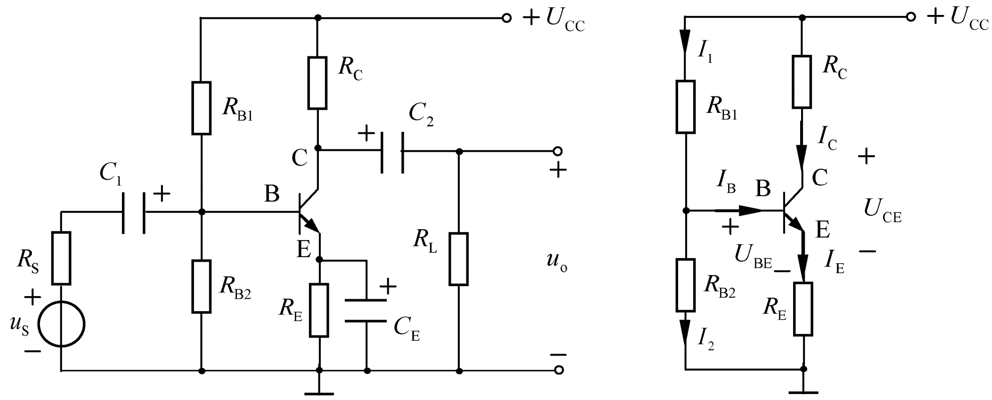
（4）电压波形的顶部出现失真，说明电路出现了截止失真，应减小 R_B 的阻值，以增大偏流 I_B，提高静态工作点。

7.2.4　稳定工作点的分压式偏置放大电路

放大电路应有合适的静态工作点，以保证良好的放大效果，避免非线性失真。而静态工作点是由三极管的参数、放大电路的偏置电路以及电路所处环境共同决定的。由于三极管是由半导体材料制成的，其中温度变化的影响是很大的。当环境温度变化时，三极管的参数 I_{CBO}（I_{CEO}）、β 及 U_{BE} 都会随之而变化，最终的结果都是导致 I_C 变化，使静态工作点移向非线性区。因此，固定偏置放大电路受环境温度变化影响，会产生静态工作点漂移。要想克服这一缺点，必须对电路加以改进。

1．分压式偏置放大电路的基本特点

分压式偏置放大电路的设计思路就是尽可能排除或减小温漂对静态工作点的影响。图 7.22 所示是常用分压式偏置放大电路。R_{B1} 和 R_{B2} 构成偏置电路，R_{B1} 称为上偏电阻，R_{B2} 称为下偏电阻。同时，增加了射极电阻 R_E 和旁路电容 C_E。



(a)原理图　　(b)直流通路

图 7.22　分压式偏置放大电路

（1）利用上偏电阻 R_{B1} 和下偏电阻 R_{B2} 组成分压器以固定基极电位。

根据图 7.22（b）所示，$I_1 = I_B + I_2$。选择合适的参数，使 $I_2 >> I_B$。这样，I_B 相对于 I_1、I_2 可以忽略，便有

$$I_1 \approx I_2 = \frac{U_{CC}}{R_{B1} + R_{B2}} \tag{7-27}$$

则基极电位为

$$V_B = \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} U_{CC} \tag{7-28}$$

式（7-28）表明，基极电位几乎仅取决于 R_{B2} 对 U_{CC} 的分压，而与三极管的参数无关，因而当温度变化时，可认为 V_B 是基本不变的。

（2）引入发射极电阻 R_E，限制温漂影响。由图 7.22（b）可列出电压方程为

$$U_{BE} = V_B - V_E = V_B - I_E R_E \tag{7-29}$$

若使 $V_B >> U_{BE}$，则 U_{BE} 的影响可忽略不计，即尽可能地减小了温漂的影响，有

$$I_C \approx I_E = \frac{V_B - U_{BE}}{R_E} \approx \frac{V_B}{R_E} \tag{7-30}$$

这样发射极电流 I_E 及集电极电流 I_C 就与三极管的参数几乎无关，仅取决于电路中电阻与电源的参数，不仅将温度的影响降到了最低，而且在使用不同β值的三极管时，工作点也可近似不变，这样非常有利于实际应用。

2．稳定工作点的原理

当温度升高时，I_{CBO}、β、U_{BE} 的变化导致集电极电流 I_C 和射极电流 I_E 增大，射极电阻 R_E 上的电压 V_E 也随之增大。由于基极电位 V_B 为分压电路所固定，所以 U_{BE} 随 V_E 的增大而减小，因此 I_C 随温度的升高而增大部分可被 I_B 减小导致的 I_C 减小部分相抵消，静态工作点基本保持不变，即

$$T\uparrow \rightarrow I_C\uparrow \rightarrow V_E\uparrow \rightarrow U_{BE}\downarrow \rightarrow I_B\downarrow \rightarrow I_C\downarrow$$

可见，这种电路能稳定工作点的实质，是利用射极电阻的作用来抑制集电极电流的变化而使静态工作点基本不变。

为了减小射极电阻 R_E 对放大电路交流特性的影响，一般在 R_E 旁并联一个旁路电容 C_E，它对交流信号相当于短路。

3．电路参数的选择

在满足 $I_2>>I_B$ 和 $V_B>>U_{BE}$ 的条件下，分压式偏置放大电路可以实现静态工作点的基本稳定。这就需要把 R_{B1} 和 R_{B2} 的值取小些，但阻值太小会增加功率损耗，并且会降低放大电路的输入电阻，影响动态性能。对于硅管，一般取 I_1=（5～10）I_B，V_B=（3～5）V。对于锗管，一般取 I_1=（10～20）I_B，V_B=（1～3）V。

4．静态工作点的确定

由于 $I_1>>I_B$，$I_2>>I_B$，根据图 7.22（b）所示直流通路，可求得分压式偏置放大电路的静态工作点。基极电位由式（7-28）决定，其余变量对应值分别为

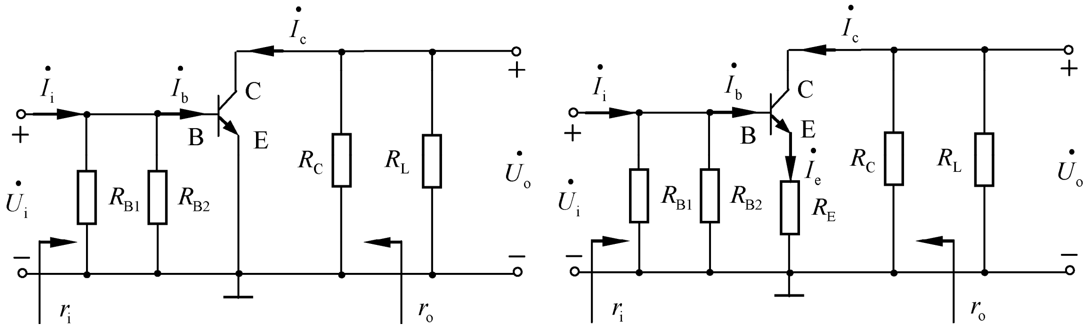
$$\left.\begin{aligned} I_C &\approx I_E = \frac{V_B - U_{BE}}{R_E} \\ I_B &= \frac{I_C}{\beta} \\ U_{CE} &\approx U_{CC} - I_C(R_C + R_E) \end{aligned}\right\} \tag{7-31}$$

5．动态分析

（1）电压放大倍数 $\dot{A}_u$。

图 7.22（a）所示放大电路的交流通路如图 7.23（a）所示，其输入、输出电压表达式与固定偏置放大电路的输入、输出电压表达式相同，因此计算电压放大倍数的公式与固定偏置放大电路相同，即

$$\dot{A}_u=\frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i}=-\beta\frac{R_L'}{r_{be}} \tag{7-32}$$



（a）有旁路电容　　（b）无旁路电容

图 7.23　分压式偏置放大电路交流通路

（2）输入电阻 r_i。

放大电路的输入电阻为上、下偏置电阻与三极管的动态输入电阻的并联等效电阻，即

$$r_i=R_{B1}//R_{B2}//r_{be} \tag{7-33}$$

（3）输出电阻 r_o。

输出端也与固定偏置放大电路的情况相同，所以输出电阻为

$$r_o\approx R_C//r_{ce}\approx R_C \tag{7-34}$$

例 7.3 图 7.22（a）所示放大电路，已知 U_{CC}=12V，R_C=2kΩ，R_E=2kΩ，R_{B1}=20kΩ，R_{B2}=10kΩ，R_L=2kΩ，β=37.5，试求：

（1）静态工作点；

（2）电压放大倍数 $\dot{A}_u$；

（3）输入电阻 r_i 和输出电阻 r_o；

（4）若断开旁路电容 C_E，放大倍数 $\dot{A}_u$ 又如何？r_i 和 r_o 又如何？

解：（1）求静态工作点。

对应于图 7.22（b）所示的直流通路，可求得基极电位为

$$V_B=\frac{R_{B2}}{R_{B1}+R_{B2}}U_{CC}=\frac{10}{10+20}\times 12=4\text{V}$$

射极电流为

$$I_E=\frac{V_B-U_{BE}}{R_E}=\frac{4-0.7}{2}=1.65\text{mA}$$

所以

$I_C\approx I_E=1.65\text{mA}$

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} = \frac{1.65}{37.5} = 0.044\text{mA} = 44\mu\text{A}$$

$$U_{CE} \approx U_{CC} - I_C(R_C + R_E) = 12 - 1.65 \times (2 + 2) = 5.4\text{V}$$

（2）求放大倍数 $\dot{A}_u$。

根据图 7.23（a）所示的交流通路，可求得电压放大倍数为

$$\dot{A}_u = -\beta \frac{R_L'}{r_{be}}$$

其中：

$$R_L' = 2 // 2 = 1\text{k}\Omega$$

$$r_{be} = 300 + (1+\beta)\frac{26}{I_E} = 300 + (1+\beta)\frac{26}{1.65} \approx 907\Omega$$

所以

$$\dot{A}_u = -37.5 \times \frac{1000}{907} = -41$$

（3）求 r_i 和 r_o。

$$r_i = R_{B1} // R_{B2} // r_{be} = 20 // 10 // 0.9 \approx 0.8\text{k}\Omega$$

$$r_o \approx R_C = 2\text{k}\Omega$$

（4）旁路电容断开。

若断开 C_E，放大电路的交流通路如图 7.23（b）所示，此时

$$\dot{U}_i = \dot{I}_b r_{be} + \dot{I}_e R_E = \dot{I}_b r_{be} + (1+\beta)\dot{I}_b R_E$$

$$\dot{U}_o = -\dot{I}_c R_L' = -\beta \dot{I}_b R_L'$$

所以

$$\dot{A}_u = \frac{-\beta R_L'}{r_{be} + (1+\beta)R_E} = \frac{-37.5 \times 1}{0.9 + (1+37.5) \times 2} = -0.48$$

可见，不接旁路电容时，放大倍数大大下降。

输入电阻 r_i 为

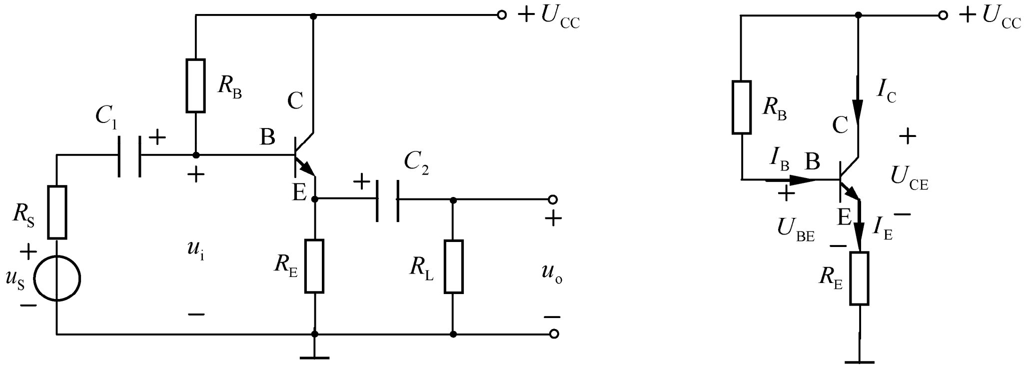
$$r_i = R_{B1} // R_{B2} // [r_{be} + (1+\beta)R_E] = 20 // 10 // [0.9 + (1+37.5) \times 2] = 6.14\text{k}\Omega$$

输出电阻 r_o 为

$$r_o \approx R_C = 2\text{k}\Omega$$

7.2.5　射极输出器

如果放大电路的信号是从发射极输出，就构成了射极输出器。射极输出器是一个共集电极电路，如图 7.24 所示，信号从基极和地之间输入，从射极和地之间输出，集电极是交流输入、输出的公共端。



(a)原理图　　(b)直流通路

图 7.24　射极输出器

1．静态分析

根据射极输出器的直流通路〔如图 7.24（b）所示〕，有

$$U_{CC} = I_B R_B + U_{BE} + I_E R_E = I_B R_B + U_{BE} + (1+\beta) I_B R_E$$

所以可得静态工作点为

$$I_B = \frac{U_{CC} - U_{BE}}{R_B + (1+\beta) R_E} \tag{7-35}$$

$$I_C = \beta I_B \tag{7-36}$$

$$U_{CE} = U_{CC} - I_E R_E \approx U_{CC} - I_C R_E \tag{7-37}$$

2．动态分析

（1）电压放大倍数。

射极输出器的交流通路如图 7.25 所示，因为

$$U_o = \dot{I}_e R_L' = (1+\beta) \dot{I}_b R_L'$$

$$R_L' = R_E // R_L$$

而

$$\dot{U}_i = \dot{I}_b r_{be} + \dot{I}_e R_L' = \dot{I}_b r_{be} + (1+\beta) \dot{I}_b R_L'$$

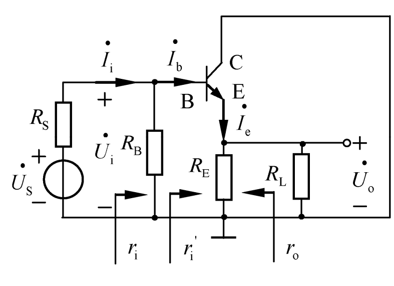


图 7.25　射极输出器交流通路

所以

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{(1+\beta)R_L'}{r_{be}+(1+\beta)R_L'} \tag{7-38}$$

通常 $r_{be} << (1+\beta)R_L'$，所以射极输出器的电压放大倍数接近于 1 而略小于 1，且输出电压与输入电压同相，因此射极输出器又称电压跟随器。

（2）输入电阻。

由图 7.25 可知：

$$r_i' = \frac{\dot{U}_i}{\dot{I}_b} = r_{be} + (1+\beta)R_L'$$

所以，总的输入电阻为

$$r_i = \frac{\dot{U}_i}{\dot{I}_i} = R_B // r_i' = R_B //[r_{be} + (1+\beta)R_L'] \tag{7-39}$$

通常电阻 R_B 很大（为几百千欧），同时β>>1，$(1+\beta)R_L' >> r_{BE}$，所以射极输出器的输入电阻很高，比共射极基本放大电路的输入电阻要高得多，一般可达几十千欧到几百千欧。同时，射极输出器的输入电阻与输出端所接的负载电阻 R_L 有关，这一点与共射极放大电路不同。

（3）输出电阻。

根据交流通路，将信号源短路，保留其内阻 R_S，则有

$$r_o = R_E // \frac{R_S' + r_{be}}{1+\beta}$$

其中，$R_S' = R_S // R_B$，$\frac{R_S' + r_{be}}{1+\beta}$ 是 $(R_S' + r_{be})$ 由基极折算到射极后的等效电阻。通常 $R_E >> \frac{R_S' + r_{be}}{1+\beta}$，且 $\beta >> 1$，所以

$$r_o \approx \frac{R_S' + r_{be}}{\beta} \tag{7-40}$$

射极输出器的输出电阻很低，比共射极放大电路小得多，一般为几十甚至十几欧姆。输出电阻越小，输出电压就越稳定，说明射极输出器具有恒压输出特性。

综上可归纳出射极输出器的特点：

① 电压放大倍数接近 1，且略小于 1。

② 输出电压与输入电压同相。

③ 输入电阻高。

④ 输出电阻低。

射极输出器的输入电阻高，可减小对信号源电流的吸收，减轻信号源的负担，因此常用作多级放大器的输入级；输出电阻低，电压放大倍数随负载的变化小，带载能力强，因此也常作为多级放大电路的输出级。利用其高输入电阻、低输出电阻以及放大倍数接近于 1 的特点，射极输出器也常被用作隔离级，以隔离前后级电路之间的相互影响。

例 7.4 射极输出器如图 7.24 所示，已知 U_{CC}=12V，β=60，R_B=200kΩ，R_E=2kΩ，R_L=2kΩ，R_S=100Ω，试求：

（1）静态工作点；

（2）$\dot{A}_u$、r_i、r_o。

解：（1）求静态工作点。

根据图 7.24（b）所示直流通路，可得

$$I_B = \frac{U_{CC} - U_{BE}}{R_B + (1+\beta)R_E} = \frac{12-0.7}{200+61\times 2} = 0.035\text{mA} = 35\mu\text{A}$$

$$I_C = \beta I_B = 60\times 0.035 = 2.1\text{mA}$$

$$U_{CE} \approx U_{CC} - I_C R_E = 12 - 2.1\times 2 = 7.8\text{V}$$

（2）求 $\dot{A}_u$、r_i、r_o。

根据图 7.25 所示的交流通路，可得

$$r_{be} = 300 + (1+\beta)\frac{26}{I_E} = 300 + (1+60)\frac{26}{2.1} = 1055\Omega = 1.06\text{k}\Omega$$

$$R'_L = R_E // R_L = 1\text{k}\Omega$$

$$\dot{A}_u = \frac{(1+\beta)R'_L}{r_{be} + (1+\beta)R'_L} = \frac{61\times 1}{1.06+61\times 1} = 0.98$$

$$r_i = R_B // [r_{be} + (1+\beta)R'_L] = 200 // (1.06 + 61\times 1) = 47.36\text{k}\Omega$$

$$r_o \approx \frac{R'_S + r_{be}}{\beta} = \frac{200\times 10^3 // 100 + 1050}{60} \approx \frac{100+1050}{60} = 19\Omega$$

7.2.6　多级放大电路

放大电路的输入信号一般情况下都很微弱，单级放大电路往往不能满足要求，常需要将若干个基本放大电路组合成多级放大电路。放大电路的级间连接称为耦合，实现耦合的电路叫作级间耦合电路。对耦合电路的基本要求是：保证各级放大电路均具有合适的静态工作点；信号损失尽可能小。

放大电路的级间耦合有阻容耦合、直接耦合和变压器耦合三种。多级交流放大电路的前置级多半采用阻容耦合方式；在功率输出级中可采用变压器耦合或直接耦合方式；而在直流及极低频放大电路中只能采用直接耦合方式。

图 7.26 所示是一个典型的两级阻容耦合放大电路。只要耦合电容 C_2 足够大，前级的输出电压就几乎可以全部加在第二级的输入端，而在 C_2 上的电压损失很小。各级放大电路的直流通路被隔断，静态工作点可以分别单独确定，互不影响。

动态分析时，无论是阻容耦合还是直接耦合，交流通路是相同的，因而可得到以下几点。

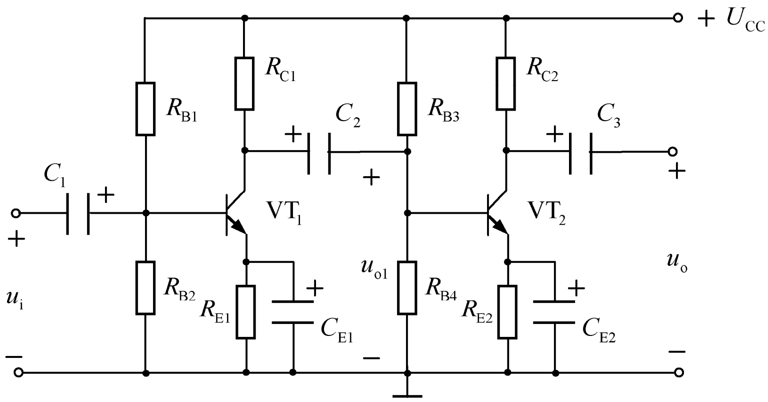


图 7.26　两级阻容耦合放大电路

（1）多级放大电路的电压放大倍数等于各级电压放大倍数的乘积。

如图 7.26 所示的两级放大电路，第一级的输出电压 $\dot{U}_{o1}$ 就是第二级的输入电压 $\dot{U}_{i2}$，所以两级放大电路的总电压放大倍数为

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{\dot{U}_{o1}}{\dot{U}_i} \cdot \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_{o1}} = \dot{A}_{u1} \cdot \dot{A}_{u2} \tag{7-41}$$

推广到多级放大电路，其总电压放大倍数为

$$\dot{A}_u = \dot{A}_{u1}\dot{A}_{u2} \cdots \dot{A}_{un} \tag{7-42}$$

式中，n 为多级放大电路的级数。

必须注意，在求某一级的电压放大倍数时，必须考虑后一级对它的影响，即应把后一级的输入电阻作为它的负载电阻。

（2）多级放大电路的输入电阻 r_i 就是第一级的输入电阻 r_{i1}，即

$$r_i = r_{i1} \tag{7-43}$$

（3）多级放大电路的输出电阻 r_o 就是最后一级的输出电阻 r_{on}，即

$$r_o = r_{on} \tag{7-44}$$

例 7.5　图 7.26 所示两级阻容耦合放大电路中，已知 R_{B1}=30kΩ，R_{B2}=15kΩ，R_{B3}=20kΩ，R_{B4}=10kΩ，R_{C1}=3kΩ，R_{C2}=2.5kΩ，R_{E1}=3kΩ，R_{E2}=2kΩ，R_L=5kΩ，$C_1=C_2=C_3$=50μF，$C_{E1}=C_{E2}$=100μF，$\beta_1=\beta_2$=40，U_{CC}=12V，试求：

（1）各级静态工作点；

（2）总电压放大倍数。

解：（1）求各级静态工作点。

第一级：

$$V_{B1} = \frac{R_{B2}}{R_{B1}+R_{B2}}U_{CC} = \frac{15}{30+15} \times 12 = 4\text{V}$$

$$I_{C1} \approx I_{E1} = \frac{V_{B1} - U_{BE1}}{R_{E1}} = \frac{4-0.7}{3} = 1.1\text{mA}$$

$$I_{B1} = {I_{C1}}/{\beta_1} = 27.5\mu\text{A}$$

$$U_{CE1} \approx U_{CC} - I_{C1}(R_{C1} + R_{E1}) = 12 - 1.1 \times (3+3) = 5.4\text{V}$$

第二级：

$$V_{B2} = \frac{R_{B4}}{R_{B3} + R_{B4}} U_{CC} = \frac{10}{20+10} \times 12 = 4\text{V}$$

$$I_{C2} \approx I_{E2} = \frac{V_{B2} - U_{BE2}}{R_{E2}} = \frac{4-0.7}{2} = 1.65\text{mA}$$

$$I_{B2} = {I_{C2}}/{\beta_2} = 41.25\mu\text{A}$$

$$U_{CE2} \approx U_{CC} - I_{C2}(R_{C2} + R_{E2}) = 12 - 1.65 \times (2.5+2) = 4.6\text{V}$$

（2）求电压放大倍数。

VT_1 的输入电阻为

$$r_{be1} = 300 + (1+\beta_1)\frac{26}{I_{E1}} = 300 + (1+40) \times \frac{26}{1.1} = 1.27 \times 10^3 \Omega$$

VT_2 的输入电阻为

$$r_{be2} = 300 + (1+\beta_2)\frac{26}{I_{E2}} = 300 + (1+40) \times \frac{26}{1.65} = 0.95 \times 10^3 \Omega$$

第二级的输入电阻为

$$r_{i2} = R_{B3} // R_{B4} // r_{be2} = 20 // 10 // 0.95 = 0.83\text{k}\Omega$$

第一级的负载电阻为

$$R'_{L1} = R_{C1} // r_{i2} = 3 // 0.83 = 0.65\text{k}\Omega$$

第二级的负载电阻

$$R'_{L2} = R_{C2} // R_L = 2.5 // 5 = 1.67\text{k}\Omega$$

所以，第一级的电压放大倍数为

$$\dot{A}_{u1} = -\beta_1 \frac{R'_{L1}}{r_{be1}} = -40 \times \frac{0.65}{1.27} = -20.5$$

第二级的电压放大倍数为

$$\dot{A}_{u2} = -\beta_2 \frac{R'_{L2}}{r_{be2}} = -40 \times \frac{1.67}{0.95} = -70.3$$

故两级放大电路的总电压放大倍数为

$$\dot{A}_u = \dot{A}_{u1}\dot{A}_{u2} = -20.5 \times (-70.3) = 1441$$

例 7.6 一个简易助听器由三级阻容耦合放大器构成，如图 7.27 所示，各三极管的共射极电流放大倍数$\beta=100$，$U_{BE}=0.7V$。用一个内阻0.5kΩ的动圈式声电转换器检测声音信号，用一个内阻0.5kΩ的耳机作为电路的负载把放大后的声音传给使用者。试求：

（1）这个放大电路的各级静态工作点；

（2）各级及总输入电阻和输出电阻；

（3）各级及总电压放大倍数。

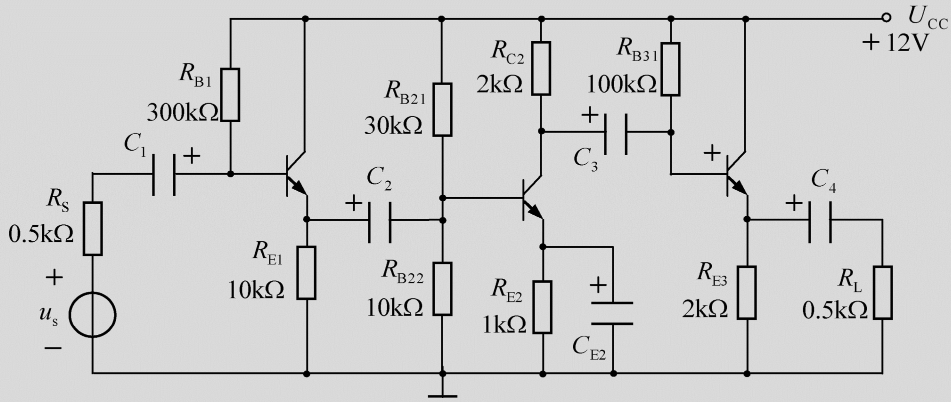


图 7.27　例 7.6 图

解：（1）求各级放大电路的静态工作点。

第一级：

$$I_{B1}=\frac{U_{CC}-U_{BE1}}{R_{B1}+(1+\beta_1)R_{E1}}=\frac{12-0.7}{300+101\times10}\text{mA}=8.6\mu\text{A}$$

$$I_{C1}=\beta_1 I_{B1}=100\times0.0086\text{mA}=0.86\text{mA}$$

$$I_{E1}\approx I_{C1}=0.86\text{mA}$$

$$U_{CE1}=U_{CC}-I_{E1}R_{E1}=(12-0.86\times10)\text{V}=3.4\text{V}$$

第二级：

$$V_{B2}=\frac{R_{B22}}{R_{B21}+R_{B22}}U_{CC}=\frac{10\times12}{30+10}=3\text{V}$$

$$I_{E2}=\frac{V_{B2}-U_{BE2}}{R_{E2}}=\frac{3-0.7}{1}\text{mA}=2.3\text{mA}$$

$$I_{C2}\approx I_{E2}=2.3\text{mA}$$

$$I_{B2}=\frac{I_{C2}}{\beta_2}=\frac{2.3}{100}\text{mA}=23\mu\text{A}$$

$$U_{CE2}\approx U_{CC}-I_{C2}(R_{C2}+R_{E2})=12-2.3(2+1)=5.1\text{V}$$

第三级：

$$I_{B3}=\frac{U_{CC}-U_{BE3}}{R_{B31}+(1+\beta_3)R_{E3}}=\frac{12-0.7}{100+101\times 2}\text{mA}=37\mu\text{A}$$

$$I_{C3}=\beta_3 I_{B3}=100\times 0.037=3.7\text{mA}$$

$$I_{E3}\approx I_{C3}=3.7\text{mA}$$

$$U_{CE3}=U_{CC}-I_{E3}R_{E3}=12-3.7\times 2=4.6\text{V}$$

(2) 求放大电路各级及总输入电阻和输出电阻。

各三极管动态输入电阻、各级放大电路交流负载及输入电阻为

$$R'_{L3}=R_{E3}//R_L=\frac{2\times 0.5}{2+0.5}=0.4\text{k}\Omega$$

$$r_{be3}=300+(1+\beta_3)\frac{26}{I_{E3}}=300+(1+100)\frac{26}{3.7}\Omega=1.01\text{k}\Omega$$

$$r_{i3}=R_{B31}//[r_{be3}+(1+\beta_3)R'_{L3}]=100//(1.01+101\times 0.4)=29.3\text{k}\Omega$$

$$r_{be2}=300+(1+\beta_2)\frac{26}{I_{E2}}=300+\frac{101\times 26}{2.3}\Omega=1.442\text{k}\Omega$$

$$R'_{L2}=R_{C2}//r_{i3}=\frac{2\times 29.3}{2+29.3}=1.87\text{k}\Omega$$

$$r_{i2}=R_{B21}//R_{B22}//r_{be2}=30//10//1.442=1.21\text{k}\Omega$$

$$r_{be1}=300+(1+\beta_1)\frac{26}{I_{E1}}=300+\frac{101\times 26}{0.86}\Omega=3.353\text{k}\Omega$$

$$R'_{L1}=R_{E1}//r_{i2}=\frac{10\times 1.21}{10+1.21}=1.08\text{k}\Omega$$

$$r_{i1}=R_{B1}//[r_{be1}+(1+\beta_1)R'_{L1}]=300//(3.353+101\times 1.08)=81.78\text{k}\Omega$$

各级放大电路输出电阻为

$$r_{o1}=R_{E1}//(\frac{r_{be1}+R_S//R_{B1}}{1+\beta_1})=10//(\frac{3.353+0.5//300}{101})\text{k}\Omega=37.9\Omega$$

$$r_{o2}\approx R_{C2}=2\text{k}\Omega$$

$$r_{o3}=R_{E3}//(\frac{r_{be3}+R_{B31}//r_{o2}}{1+\beta_3})=2//(\frac{1.01+100//2}{101})\text{k}\Omega=29\Omega$$

(3) 求各级电压放大倍数。

第一级放大电路的电压放大倍数为

$$\dot{A}_{u1}=\frac{(1+\beta_1)R'_{L1}}{r_{be1}+(1+\beta_1)R'_{L1}}=\frac{101\times 1.08}{3.353+101\times 1.08}\approx 1$$

第二级放大电路的电压放大倍数为

$$\dot{A}_{u2}=-\beta_2\frac{R'_{L2}}{r_{be2}}=-\frac{100\times1.87}{1.442}=-129.7$$

第三级放大电路的电压放大倍数为

$$\dot{A}_{u3}\approx1$$

电路的总电压放大倍数为

$$\dot{A}_u=\dot{A}_{u1}\dot{A}_{u2}\dot{A}_{u3}=1\times(-129.7)\times1=-129.7$$

7.3 应 用 举 例

例 7.7 串联型直流稳压电源电路。

在第 6 章我们学习到直流稳压电路是在变压、整流和滤波电路的基础上，再增加稳压环节组成的，其主要包括调整环节、比较放大、基准以及取样，如图 7.28 所示。有些稳压电路中还有过载或短路保护装置。

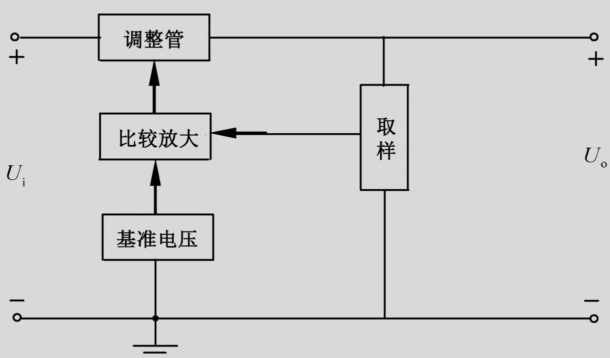


图 7.28 直流稳压电路的组成框图

利用本章学习的半导体三极管，可以构成稳定性和精度更高的串联型直流稳压电源，如图 7.29 所示。图中，变压器 Tr 起降压作用，由四只半导体二极管 VD_1～VD_4 组成桥式整流电路，将交流电变为脉动的直流电，经电容 C_1 滤波后，再由稳压、放大、取样环节，控制 VT_6、VT_7 组合三极管的导通情况，输出直流电。

其中，R_3、R_4 和 R_P 组成取样电路，将输出电压 U_o 的变化量通过电阻分压器来“取样”送到 VT_8 的基极，与稳压半导体二极管 VD_Z 为 VT_8 发射级提供的基准电压比较后，放大器将误差信号放大，以控制 VT_6 和 VT_7 组合三极管的导通；VT_6 起分压、调整作用，改变了 U_{CE6} 就会改变 U_o，即输出电压 $U_o=U_{C1}-U_{CE6}$。VT_6 与负载串联，由此得名串联稳压电路。工作原理如下：

当负载发生变化或其他一些扰动因素引起稳压源的供电电压升高时，电源本身会产生如下一系列调节过程：$U_o\uparrow\rightarrow U_{B8}\uparrow\rightarrow U_{C8}\downarrow\rightarrow U_{B7}\downarrow\rightarrow U_{B6}\downarrow\rightarrow U_{C6}\uparrow\rightarrow U_o\downarrow$，若调

整得好，U_o 的升高和 U_o 的降低可相互抵消，保证电源的输出电压稳定。

当电源电压因某种因素降低时，引起 $U_o\downarrow\to U_{B8}\downarrow\to U_{C8}\uparrow\to U_{B7}\uparrow\to U_{B6}\uparrow\to U_{C6}\downarrow\to U_o\uparrow$，若调整得好，$U_o$ 的降低和 U_o 的升高可相互抵消，保证其输出电压的稳定。

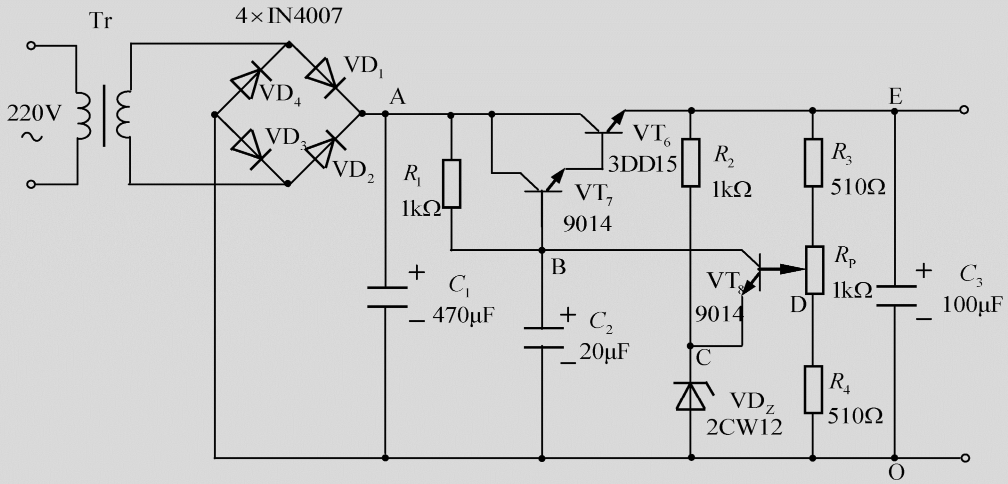


图 7.29　串联型直流稳压电源图

例 7.8 交流闪烁指示灯电路。

交流闪烁指示灯电路如图 7.30 所示。此电路利用电容 C 的充、放电特性和晶体三极管 VT 在雪崩击穿状态下的负阻特性，巧妙地构成了一个弛张振荡器。

电源接通后，220V 交流电经二极管 VD_1 半波整流、电阻 R_1 限流后，对电容 C 进行充电。当其两端电压上升到三极管 VT 的雪崩电压（实际测量值约 9V）时，就会通过导通的 VT 迅速放电，使串入放电回路中的发光二极管 LED 发光。电容 C 放电结束后，VT 恢复为截止状态，LED 再次熄灭，此后 C 又开始充电并重复上述过程。由此 LED 发出动感强烈、醒目的闪烁光。

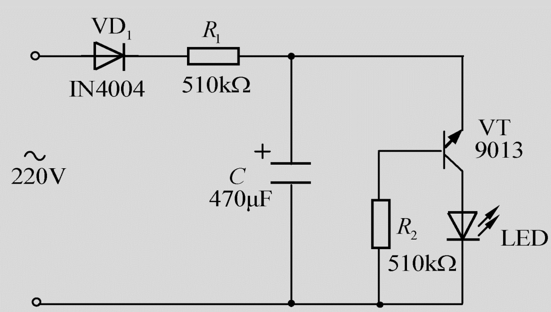


图 7.30　交流闪烁指示灯电路

本 章 小 结

本章讲述了三极管的结构、放大原理、输入输出特性及参数，在此基础上，重点讲述了三极管基本放大电路的组成、原理及分析方法。

三极管有三种工作状态。工作在放大状态时，具有电流放大作用。发射结正偏、集电结反偏是三极管工作在放大区的外部条件。工作在截止状态时，集电结和发射结均反偏，截止时的漏电流很小。工作在饱和状态时，集电结和发射结均正偏，饱和导通压降很小。

放大电路必须设置合适的静态工作点。放大电路的分析方法主要有图解法和近似计算法。分析放大电路应遵循“先静态，后动态”的规律。静态分析根据直流通路进行，动态分析根据交流通路进行。

多级放大电路的静态工作点可独立分析。进行动态分析时要注意，后级的输入电阻就是前级的负载电阻，而前级就是后级的信号源，其输出电阻就是后级的信号源内阻。各级放大电路的电压放大倍数可单独计算，总电压放大倍数等于各级电压放大倍数的乘积。

习　题　7

7.1　填空题

（1）晶体管具有______放大作用。

（2）晶体管具有放大作用时，其外部必须具备的条件是发射结____________，集电结______________。

（3）放大电路必须设置合适的______________，以保证放大质量。

（4）通常希望放大电路的输入电阻___，输出电阻___。

（5）共射极放大电路中，输入、输出的公共端是______________，输入电压与输出电压相位______。

（6）画放大电路的直流通路时，电容______；画交流通路时电容______，直流电源______________。

（7）放大电路的静态工作点过高，可能出现__________失真；静态工作点过低，可能出现________失真。

（8）分压式偏置放大电路具有稳定________________的特点。

（9）射极输出器是共______极电路，其电压放大倍数_______并约等于___，且输入电压、输出电压相位________，又称电压跟随器。

（10）射极输出器输入电阻____，输出电阻____。

（11）放大电路无交流信号时的状态叫作______，有交流信号时的状态叫作______。

（12）多级放大电路通常采用的级间耦合方式有______耦合、______耦合和______耦合。

7.2　如图 7.31 所示电路中，哪个电路对正弦交流信号具有电压放大作用？哪个不能？为什么？

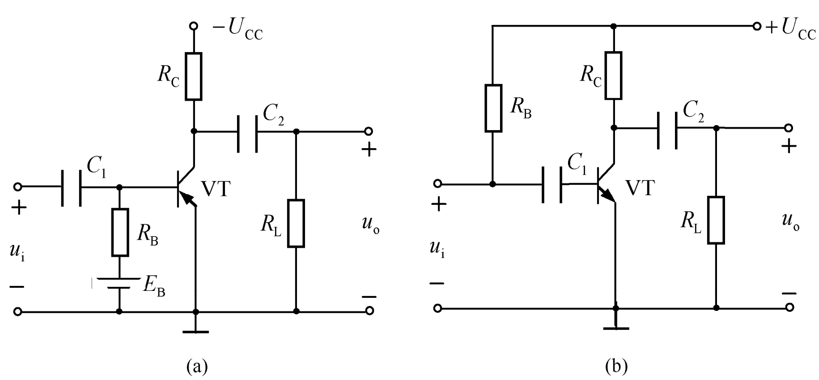


图 7.31　习题 7.2 图

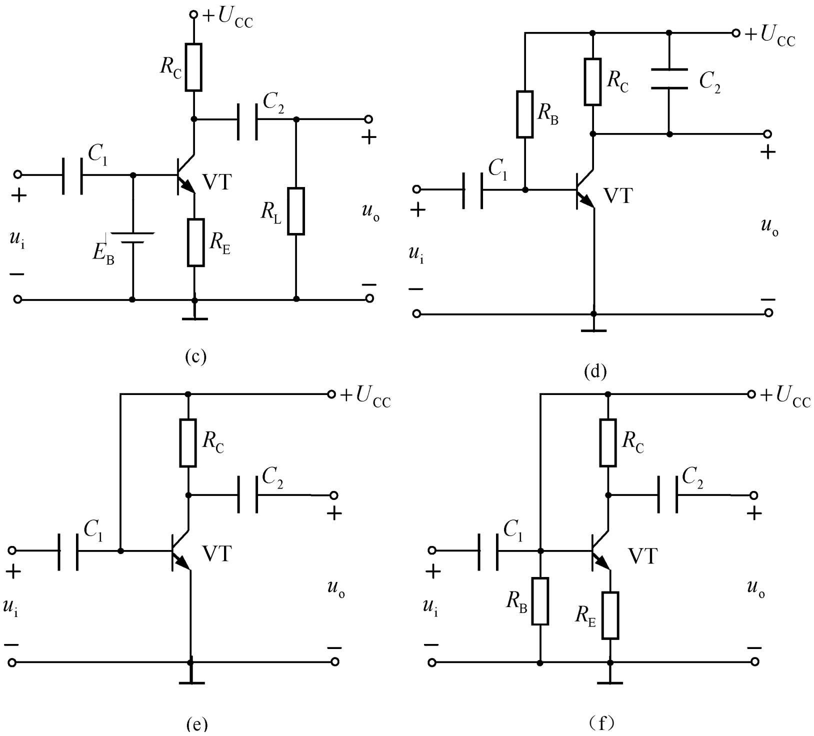


图 7.31　习题 7.2 图（续）

7.3　三极管放大电路如图 7.32（a）所示，已知 U_{CC}=12V，R_C=3kΩ，R_B=240kΩ，β=40。试求：

（1）估算静态工作点；

（2）如三极管的输出特性如图 7.32（b）所示，用图解法求静态工作点；

（3）静态时，C_1、C_2 上的电压各为多少？极性如何？

7.4　如图 7.32（a）所示放大电路，已知 U_{CC}=12V，β=50，r_{be}=1kΩ，R_L=6kΩ，U_{CE}=6V，I_C=1mA。试求：

（1）基极电阻 R_B 和集电极电阻 R_C；

（2）电压放大倍数 $\dot{A}_u$；

（3）若测得输出电压 U_o=300mV，则输入电压 U_i 是多少？

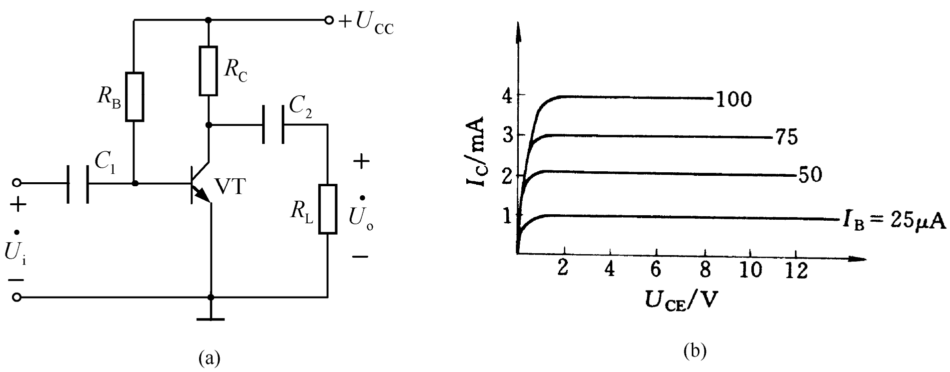


图 7.32　习题 7.3 和习题 7.4 图

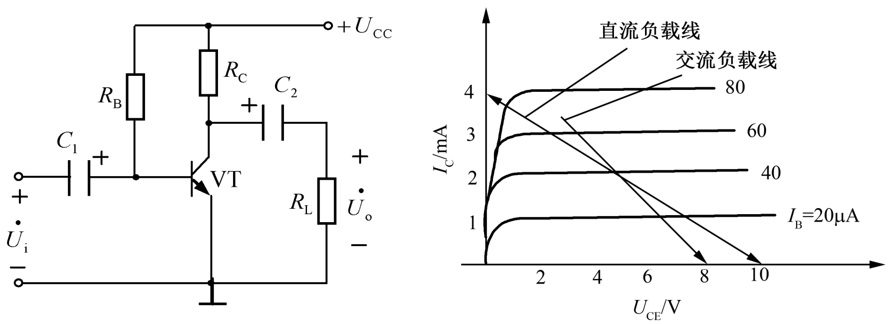
7.5　如图 7.33（a）所示放大电路，三极管的输出特性及放大电路的交、直流负载线如图 7.33（b）所示。试求：

（1）R_B、R_C、R_L 各为多少？

（2）不产生失真的最大输入电压 U_{im} 为多少？

（3）若不断加大输入电压的幅值，该电路首先出现何种失真？如何消除？

（4）若电路其他参数不变，只更换一个β值小一半的管子，静态工作点及电压放大倍数将如何变化？



(a)　　(b)

图 7.33　习题 7.5 图

7.6　如图 7.34 所示放大电路，R_{B1}=15kΩ，R_{B2}=5kΩ，R_E=2.3kΩ，R_C=5kΩ，R_L=5kΩ，U_{CC}=12V，β=50。试求：

（1）计算该电路的静态工作点及电压放大倍数；

（2）如果信号源内阻 R_S=1kΩ，求 $\dot{A}_{uS}=\dot{U}_o/\dot{U}_S=?$

7.7　射极输出器如图 7.35 所示，r_{be}=1.3kΩ，R_{B1}=120kΩ，R_{B2}=160kΩ，R_E=10kΩ，R_L=10kΩ，β=50，R_S=50Ω，U_{CC}=24V。试求：

（1）静态工作点；

（2）电压放大倍数 $\dot{A}_u$；

（3）输入电阻 r_i；

（4）输出电阻 r_o。

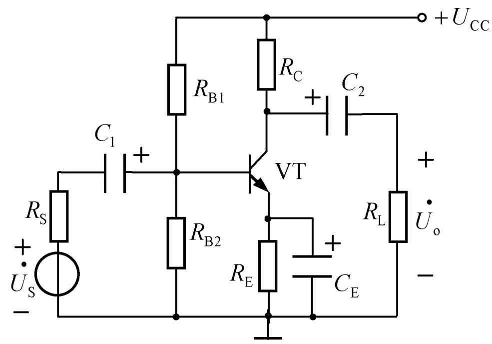


图 7.34　习题 7.6 图

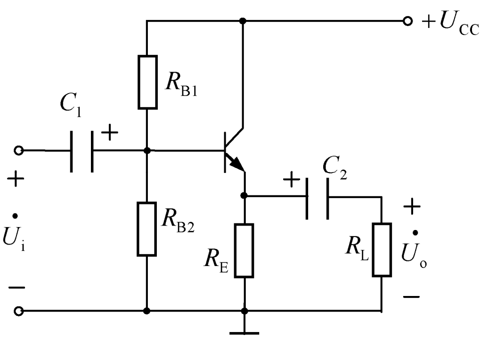


图 7.35　习题 7.7 图

7.8　如图 7.36 电路中，R_{B1}=120kΩ，R_{B2}=39kΩ，R_C=3.9kΩ，R_{E1}=2kΩ，R_{E2}=100Ω，R_L=3.9kΩ，β=60，r_{be}=1.8kΩ，U_S=15mV，R_S=0.6kΩ，U_{CC}=12V。试求：

（1）该放大电路的输入电阻 r_i 和输出电阻 r_o；

（2）输出电压 U_o；

（3）若 R_{E2}=0，U_o 为多少？

7.9　如图 7.37 所示电路中，R_{B1}=24kΩ，R_{B2}=13kΩ，R_C=2kΩ，R_E=2kΩ，R_S=100Ω，β=50，U_S=20mV，U_{CC}=10V。试求：

（1）估算 Q 点及 r_{be}；

（2）求分别从 M 点和 N 点输出时的输出电压 U_{oM} 和 U_{oN}；

（3）分别求从 M 和 N 端输出时的输出电阻；

（4）画出 u_S 为正弦波时 u_{oM} 和 u_{oN} 对应于 u_S 的波形。

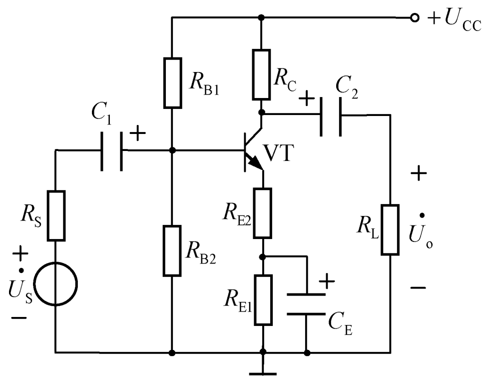


图 7.36　习题 7.8 图

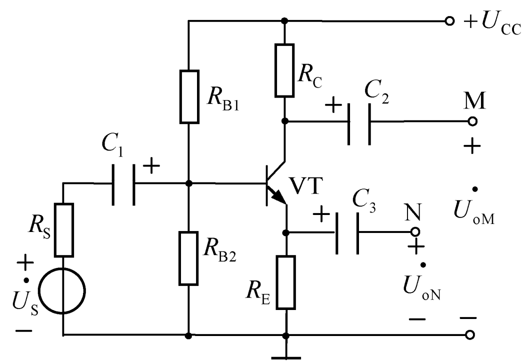


图 7.37　习题 7.9 图

7.10　两级放大电路如图 7.38 所示，已知 R_1=15kΩ，R_2=5kΩ，R_3=5kΩ，R_4=2.3kΩ，R_5=200kΩ，R_6=5kΩ，R_L=20kΩ，β_1=β_2=50，U_{CC}=12V。试求：

（1）电压放大倍数，输入电阻，输出电阻；

（2）若输入电压为 10mV，输出电压 u_o 为多少？若输出电压为 1V，输入电压 u_i 为多少？

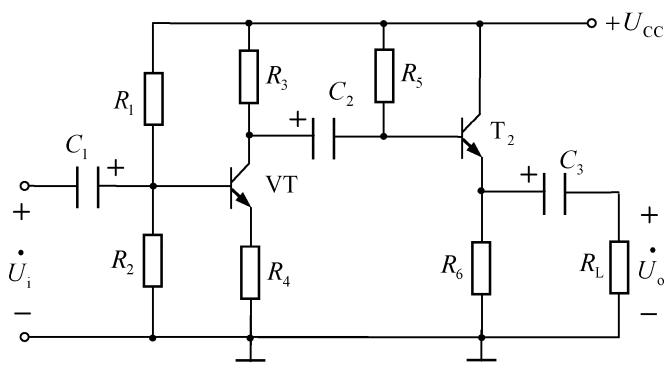


图 7.38　习题 7.10 图

7.11　如图 7.39 所示电路中，已知 U_{CC}=15V，I_C=1mA，U_{CE}=6V，β=60，估算电阻 R_E、R_{B1}、R_{B2}、R_C。

7.12　如图 7.40 所示是一个控制电灯开关的电路，被控的是 12V，3W 的电灯，电路输入端由电压为 3.5V 的正脉冲控制，三极管的β=50。当灯被接通时，三极管处于饱和状态，U_{CES}=0.2V，U_{BES}=0.8V。试设计电路参数 U_{CC}、R_B。

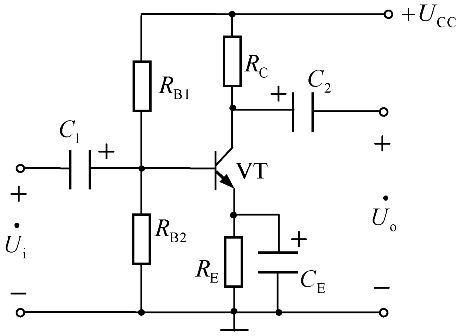


图 7.39　习题 7.11 图

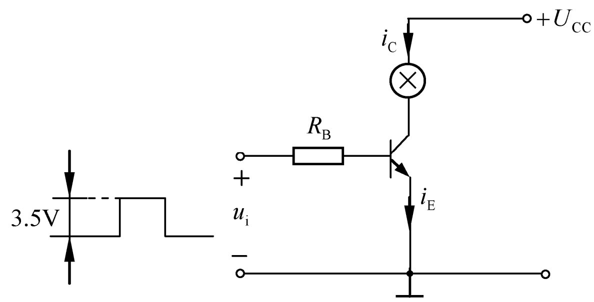


图 7.40　习题 7.12 图

7.13　如图 7.33（a）所示共射极固定偏置放大电路，实验时用示波器观察波形，输入信号为正弦波时，输出波形如图 7.41 所示，说明它们各属于什么性质的失真？如何消除？

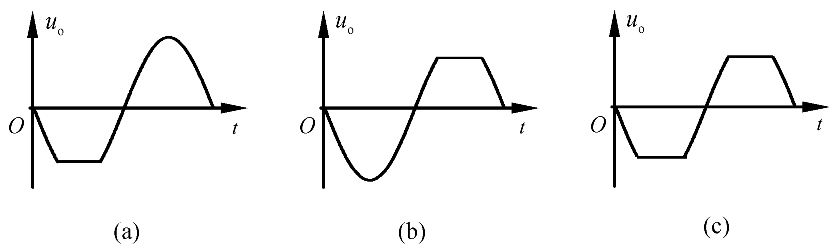


图 7.41　习题 7.13 图

第 8 章　集成运算放大器

集成运算放大器是一种具有高增益的多级放大器，是模拟集成电路中发展最快、应用最广的一种集成器件，在模拟计算机、信号变化、测量技术、计算技术、自动控制、无线电通信等领域得到广泛应用。本章在介绍集成运算放大器的基本结构、主要参数和特性的基础上，重点介绍理想运算放大器的分析方法以及集成运算放大器的应用。

8.1　集成运算放大器概述

8.1.1　集成电路简介

集成电路是采用半导体制作工艺，在一块较小的单晶硅片上制作上许多晶体管及电阻器、电容器等元器件，并按照多层布线或隧道布线的方法将元器件组合成的完整电子电路。集成电路具有体积小、重量轻、引出线和焊接点少、寿命长、可靠性高、性能好等优点，同时成本低，便于大规模生产。它不仅在工、民用电子设备如收录机、电视机、计算机等方面得到广泛的应用，同时在军事、通信、遥控等方面也得到广泛的应用。用集成电路来装配电子设备，其装配密度比晶体管可提高几十倍至几千倍，设备的稳定工作时间也可大大提高。

随着集成电路制造工艺的日益完善，目前已能将数以千万计的元器件集成在一片面积只有几十平方毫米的硅片上。按照集成度（每一片硅片中所含元器件数）的高低，将集成电路分为小规模集成电路（简称 SSI）、中规模集成电路（简称 MSI）、大规模集成电路（简称 LSI）和超大规模集成电路（VLSI）。小规模集成电路包含元件数在 99 个以下；中规模集成电路包含元件数在 100～999 个之间；大规模集成电路包含元件数在 1000～99999 个之间；超大规模集成电路是指元件数在 10 万个以上的集成电路。

集成电路按其功能、结构的不同，可以分为模拟集成电路和数字集成电路两大类。模拟集成电路用来产生、放大和处理各种模拟信号。

集成运算放大器是一种集成化的半导体器件，是模拟集成电路的一种。

8.1.2　集成运算放大器的基本构成

集成运算放大器简称集成运放，是一种放大倍数很高的多级放大电路。集成运算放大器常用于各种模拟信号的运算，例如比例运算、微分运算、积分运算等，由于它的高性能、低价位，在模拟信号处理和发生电路中几乎完全取代了分立元件放大电路。

集成运算放大器的符号如图 8.1（a）所示，它有两个输入端，一个称为反相输入端，一个称为同相输入端；一个输出端；两路电源供电。集成运放的类型很多，内部电路各不相同，但一般由四部分组成，分别为输入级、中间级、输出级和偏置电路，如图 8.1（b）所示。

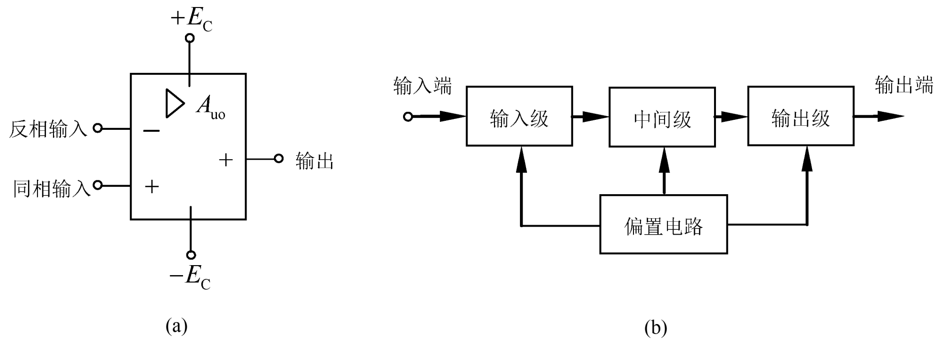


图 8.1　集成运放符号及电路框图

输入级：通常由双端输入的差动放大电路组成，以抑制零漂，提高输入电阻。其差模输入电阻一般可达 10^5～$10^6\Omega$。

中间级：是整个电路的主放大器，进行一级或多级电压放大，要求它的电压放大倍数高，一般采用多级共发射极放大电路组成。

输出级：与负载相接，要求其输出电阻小，有较强的带负载能力，且非线性失真小，一般由互补对称电路或射极输出器构成。

偏置电路：为各级放大电路提供合适的静态工作点。一般由恒流源电路构成。

此外，还有一些过载保护电路及高频补偿环节等辅助环节。

8.1.3　集成运算放大器的主要参数

1．最大输出电压 U_{opp}

使输出电压和输入电压保持不失真关系的输出电压的最大值。

2．开环电压放大倍数 A_{uo}

集成放大电路在没有外接反馈电路、输出端开路状态下的电压放大倍数。它是决定运算精度的重要因素。要求 A_{uo} 越大越好。

3．输入失调电压 U_{io}

一个理想的集成运放，当输入电压为零时，输出电压也应为零。但实际上它的差动输入级很难做到完全对称。所以通常在输入电压为零时，存在一定的输出电压。输入电压为零时，为了使集成运放的输出电压为零，在输入端加的补偿电压叫作输入失调电压 U_{io}。U_{io} 的大小反映了运放中电路制造的对称程度和电位配合情况。U_{io} 越大，电路的对称性越差。

4．输入失调电流 I_{io}

当输入信号为零时，两个输入端的静态基极电流之差，称为输入失调电流 I_{io}。I_{io} 是由差动放大电路的三极管特性、参数不一致等原因引起的。希望其越小越好。

除上述参数外，还有共模抑制比、最大差模输入电压、最大共模输入电压、输入电阻、输出电阻、功耗等参数，可参阅有关手册。

8.1.4　集成运算放大器的电压传输特性

集成运放的电压传输特性是指开环输出时输出电压与输入电压之间的关系曲线。集成运算放大器的电压传输特性如图 8.2 所示，它可分为线性区和饱和区，这为运算放大器在不同方面的应用提供了可能。

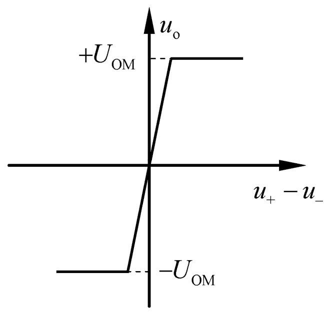


图 8.2　电压传输特性

当集成运放工作在线性区时，它的输出信号 u_o 与输入信号 (u_+-u_-) 是线性关系，即

$$u_o=A_{uo}(u_+-u_-) \tag{8-1}$$

式中，u_+ 和 u_- 分别是同相输入端和反相输入端的对地电压。由于集成运放的开环电压增益很大，而输出电压有限，所以集成运放的线性区很窄。为了使集成运放工作在线性区，常引入深度负反馈，以减小净输入电压 u_+-u_-，保证输出电压不超出线性范围。

当集成运放处于开环工作状态或者引入正反馈时，一般工作在非线性区，即输出电压不再随着输入电压变化线性增长，而是进入饱和状态。在此状态下，当 $u_+>u_-$ 时，$u_o=+U_{OM}$；当 $u_+<u_-$ 时，$u_o=-U_{OM}$。

8.1.5　集成运放的理想特性

为了简化集成运放应用电路的分析过程，常将集成运放理想化，即认为：

（1）开环电压放大倍数 $A_{uo}=\infty$；

（2）输入电阻 $r_i=\infty$；

（3）输出电阻 $r_o=0$；

图 8.3 是理想运算放大器的图形符号，同相输入端、反相输入端、输出端的对“地”电压分别用 u_+、u_- 和 u_o 表示。与实际运放符号的主要不同在于开环放大倍数用“∞”表示。

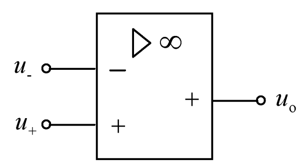


图 8.3　理想运放图形符号

依据理想运算放大器的上述三个特点，可以得出两个重要推论：虚短和虚断。

① 理想运放的净输入电压为零，即

$$u_+-u_-=0$$

或

$$u_+=u_- \tag{8-2}$$

由于理想运放的开环放大倍数 $A_{uo}=\infty$，输出电压 $u_o=A_{uo}(u_+-u_-)$ 为有限值，当集成运放工作在线性区时，净输入电压 $u_+-u_-=\dfrac{u_o}{A_{uo}}\approx 0$，即 $u_+\approx u_-$，反相输入端与同相输入端电位相等，通常称之为“虚短”。

② 理想运放的净输入电流为零，即

$$i_i=0 \tag{8-3}$$

由于理想运放的输入电阻 r_i 为无穷大，可认为两个输入端的输入电流为零，相当于断

路而非断路，称之为“虚断”。

“虚短”和“虚断”是理想集成运放的重要特征，也是分析运放工作电路的重要依据。

8.2　集成运算放大电路的应用

集成运放的基本应用可分为两类，即线性应用和非线性应用。当集成运放外加负反馈使其闭环工作在线性区时，可构成模拟信号运算放大电路、正弦波振荡电路和有源滤波电路等，称为线性应用。当集成运放处于开环或外加正反馈使其工作在非线性区时，可构成各种幅值比较电路和矩形波发生器等，称为非线性应用。

8.2.1　集成运放构成运算电路

集成运放外接不同的负反馈或输入电路，并使其工作在线性区，可完成对模拟信号的多种运算，如比例、加法、减法、积分、微分等运算。

1．比例运算电路

（1）反相比例运算电路。

如图 8.4 为反相比例运算器。输入信号 u_i 经 R_1 加到反相输入端，R_2 为补偿电阻，反馈电阻 R_f 跨接在输出端和反相输入端之间。R_2 取值为

$$R_2 = R_1 // R_f$$

用来保证静态时差动式输入电路的对称性，因此又称平衡电阻。

由于 $i_i = 0$，则 $u_+ = 0$；又因 $u_+ \approx u_-$，所以反相输入端的对地电压 $u_- \approx 0$，称为“虚地”。

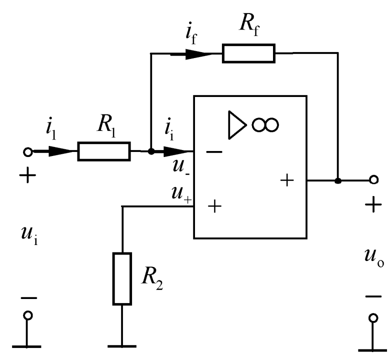


图 8.4　反相比例运算器

根据理想运放“虚短”和“虚断”特征，可得 $i_1 = i_f$，$u_- = u_+$，$u_+ = 0$。由图 8.4 可得

$$i_1 = \frac{u_i - u_-}{R_1}，\quad i_f = \frac{u_- - u_o}{R_f}$$

因此

$$u_o = -\frac{R_f}{R_1} u_i \tag{8-4}$$

由此可得闭环电压放大倍数为

$$A_{uf} = \frac{u_o}{u_i} = -\frac{R_f}{R_1} \tag{8-5}$$

式中的负号表明输出电压与输入电压相位相反，它们的大小彼此成一定的比例关系，故称为反相比例放大器。

如果 R_1 和 R_f 的阻值足够精确，而且运算放大器的开环电压放大倍数 A_{uo} 足够高，就可以认为 u_o 与 u_i 间的关系只取决于反馈电阻 R_f 与输入端电阻 R_1 的比值，而与运算放大器本身

的参数无关，从而保证了运算精度和稳定性。实质上是通过集成运放的本质特性，借助于外接电路，组成了输入、输出之间的特定函数关系。

当 R_f=R_1 时，A_{uf}=−1，输出电压与输入电压大小相等、相位相反，这时电路称为倒相器或反相器。

例 8.1 在图 8.4 所示比例运算器中，设 $R_1 = 10\text{k}\Omega$，$R_f = 50\text{k}\Omega$。求 A_{uf}。如果 $u_i = -1\text{V}$，则 u_o 为多少？

解：由式（8-5）得

$$A_{uf} = -\frac{R_f}{R_1} = \frac{-50}{10} = -5$$

则

$$u_o = A_{uf} u_i = -5 \times (-1) = 5\text{V}$$

（2）同相比例运算电路。

如图 8.5 为同相比例运算电路，与反相比例运算电路不同，输入信号从同相端引入，反馈电阻 R_f 接法不变，输入回路中接入电阻 $R_2 = R_1 // R_f$。

因为

$$u_- = u_+ = u_i$$

$$i_1 = i_f$$

又

$$i_1 = -\frac{u_-}{R_1} = -\frac{u_i}{R_1}$$

$$i_f = \frac{u_- - u_o}{R_f} = \frac{u_i - u_o}{R_f}$$

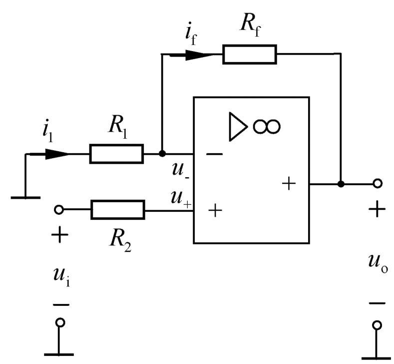


图 8.5　同相比例运算器

所以

$$u_o = (1 + \frac{R_f}{R_1}) u_i \tag{8-6}$$

闭环电压放大倍数

$$A_{uf} = \frac{u_o}{u_i} = 1 + \frac{R_f}{R_1} \tag{8-7}$$

A_{uf} 也与放大器参数无关，且总是大于或等于 1 的正值，表示输入电压与输出电压同相。

当 R_1=∞（断开）或 R_f=0（短接）时，A_{uf}=1，输出电压和输入电压大小相等、相位相同，此时称为电压跟随器，它是同相比例放大器的一个特例。

需要注意的是，在同相输入的运算放大器中，$u_- \neq 0$，而近似等于输入电压 u_i，虚地概念不再存在，这是同相输入运算放大器与反相输入运算放大器的重要区别。

例 8.2 如图 8.6 所示运算放大电路，R_1=15kΩ，R_2=15kΩ，R=7.5kΩ，E=15V。试分析其输入输出关系。

解：因为 $i_i = 0$，所以

$$u_+ = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times E = 7.5\text{V}$$

$$u_o = u_- \approx u_+ = 7.5\text{V}$$

这是一个电压跟随器。u_o 只与电源电压和分压电阻有关，其精度和稳定性较高，可作为基准电压。

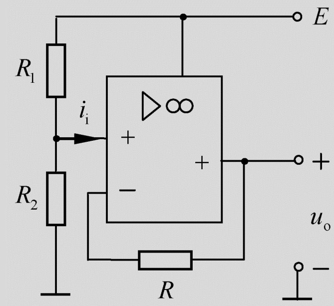


图 8.6　例 8.2 图

2．加法运算电路

在反相输入端增加若干输入支路，则构成反相加法运算器，如图 8.7 所示。由于反相输入端净输入电流为零，根据节点电流定律，则有

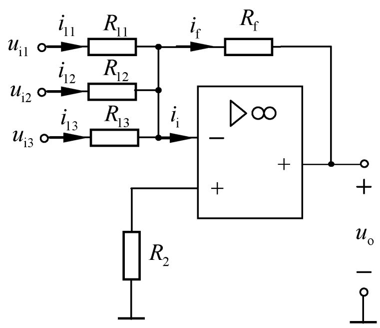


图 8.7　加法运算器

$$i_f = i_{11} + i_{12} + i_{13}$$

结合反相输入端“虚地”的概念，则有

$$\frac{u_{i1}}{R_{11}} + \frac{u_{i2}}{R_{12}} + \frac{u_{i3}}{R_{13}} = \frac{-u_o}{R_f}$$

所以

$$u_o = -\left(\frac{R_f}{R_{11}}u_{i1} + \frac{R_f}{R_{12}}u_{i2} + \frac{R_f}{R_{13}}u_{i3}\right) \tag{8-8}$$

式（8-8）表明，输出电压等于各输入电压按照不同比例相加。如果 $R_{11} = R_{12} = R_{13}$，则有

$$u_o = -\frac{R_f}{R_1}\left(u_{i1} + u_{i2} + u_{i3}\right) \tag{8-9}$$

与式（8-5）相比可知，这样的电路也是一种反相输入比例放大器，只不过它的输出电压与各输入电压之和成比例，实现“和放大”，称为反相加法器。

当 $R_1 = R_2 = R_3 = R_f$ 时，则

$$u_o = -\left(u_{i1} + u_{i2} + u_{i3}\right) \tag{8-10}$$

即输出电压等于各输入电压之和。可见，加法运算电路中相加项的比例系数只与外部电路的电阻有关，与放大器本身的参数无关，故稳定性高。

加法器中的平衡电阻为

$$R_2 = R_{11} // R_{12} // R_{13} // R_f$$

例 8.3 在图 8.8 所示电路中，已知 $R_1 = R_2 = 30\text{k}\Omega$，$R_3 = 15\text{k}\Omega$，$R_4 = 20\text{k}\Omega$，$R_5 = 10\text{k}\Omega$，$R_6 = 20\text{k}\Omega$，$R_7 = 5\text{k}\Omega$，$u_{i1} = 0.5\text{V}$，$u_{i2} = -1\text{V}$。求输出电压 u_o。

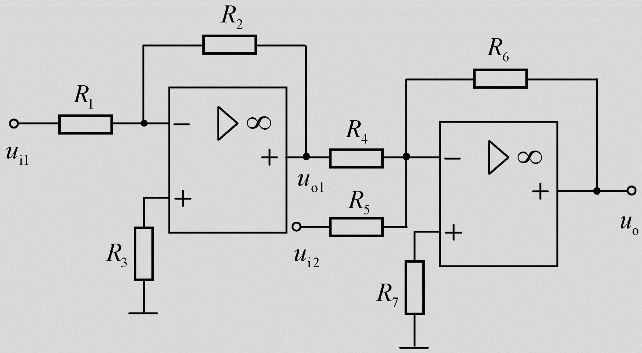


图 8.8　例 8.3 图

解：第一级是反相器，其输出电压为

$$u_{o1} = -\frac{R_2}{R_1}u_{i1} = -u_{i1} = -0.5\text{V}$$

第二级为反相输入加法器，故输出电压为

$$u_o = -\left(\frac{R_6}{R_4}u_{o1} + \frac{R_6}{R_5}u_{i2}\right) = -\left(\frac{20}{20}\times(-0.5) + \frac{20}{10}\times(-1)\right) = 2.5\text{V}$$

3．减法运算电路

如图 8.9 为差动减法运算电路。输入信号 u_{i1}、u_{i2} 此时将分别加到放大器的反相输入端和同相输入端。因为 $u_- = -i_1R_1 + u_{i1}$，且

$$u_+ = \frac{R_3}{R_2 + R_3}u_{i2}$$

而

$$u_- = u_+$$

$$i_1 = i_f = \frac{u_{i1} - u_o}{R_1 + R_f}$$

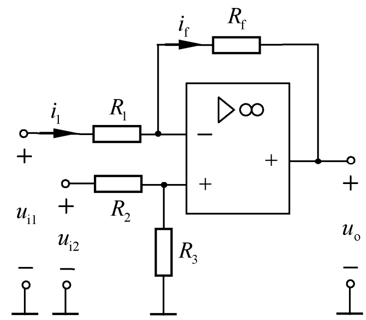


图 8.9　减法运算器

故

$$u_o = \frac{(R_1 + R_f)R_3}{R_1(R_2 + R_3)}u_{i2} - \frac{R_f}{R_1}u_{i1} \tag{8-11}$$

在本例中，因为运放是工作在线性区的，所以对该运算电路还可以采用叠加原理进行分析。差动输入运算放大器可以理解为是由 u_{i1}，u_{i2} 分别单独作用时的反相输入比例运算器和同相输入比例运算器组合而成的。不过对于同相输入而言，此时的输入信号 u_{i2} 不是直接加在同相输入端，而是经由电阻 R_2、R_3 分压后加到同相输入端的。

当 $R_1=R_2$，$R_f=R_3$ 时，式（8-11）简化为

$$u_o = \frac{R_f}{R_1}(u_{i2} - u_{i1}) \tag{8-12}$$

输出电压与两个输入电压的差值成正比，这种输入方式便是差分输入方式。

当 $R_1=R_2=R_f=R_3$ 时，则有

$$u_o = (u_{i2} - u_{i1}) \tag{8-13}$$

此电路便成为一个减法器。差分输入运算电路在自动控制系统以及测量系统中得到广泛应用。

4．积分运算电路

用电容代替反相比例运算电路中的反馈电阻 R_f，就构成了积分运算电路。如图 8.10 所示为反相输入积分运算电路。

因为 $u_- \approx u_+ = 0$，且 $i_i = 0$，故 $i_1 = i_f = u_i/R_1$，所以

$$u_o = -u_C = -\frac{1}{C_f}\int i_f \mathrm{d}t = -\frac{1}{R_1C_f}\int u_i \mathrm{d}t \tag{8-14}$$

可见 u_o 与 u_i 的积分成比例。当 u_i 为一幅值等于 U 的正向阶跃电压时，则有

$$u_o = -\frac{U}{R_1C_f}t \tag{8-15}$$

输出电压 u_o 将随时间线性增长，直到 u_o 达到饱和值，其波形如图 8.11 所示。

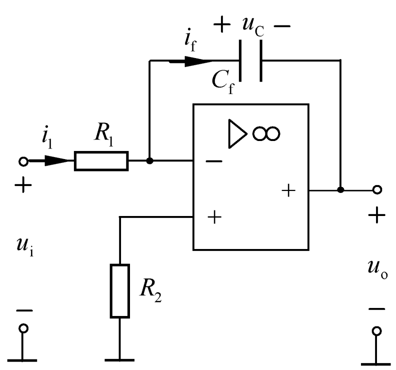


图 8.10　积分运算电路

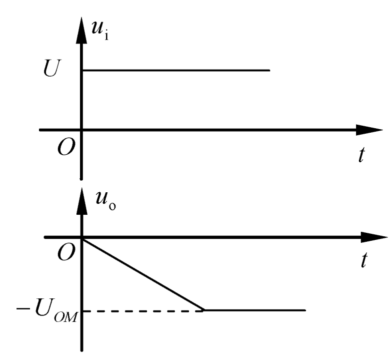
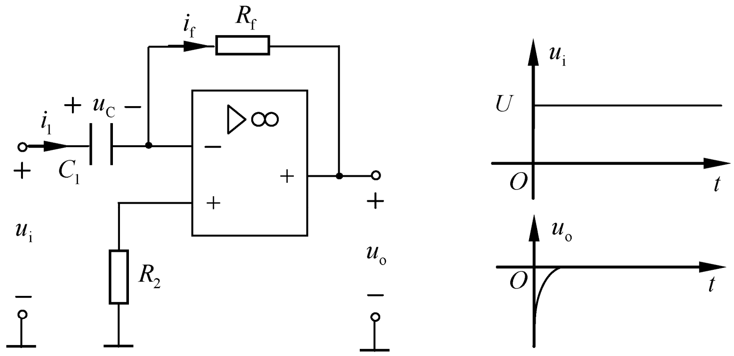


图 8.11　积分运算阶跃响应波形图

5．微分运算电路

将积分运算电路中的反相输入端的电阻与反馈电容调换位置，可得到如图 8.12 所示的微分运算电路。



(a)电路　　(b)阶跃响应波形图

图 8.12　微分运算电路

根据集成运放的特性可得

$$u_o = u_- - i_f R_f = -i_f R_f = -i_1 R_f$$

而

$$i_1 = C_1 \frac{du_C}{dt}$$

所以

$$u_o = -R_f C_1 \frac{du_i}{dt} \tag{8-16}$$

式（8-16）表明，输出电压与输入电压的微分成正比。

例 8.4 试求图 8.13 所示电路的 u_o 与 u_i 关系式。

解：由图 8.13 可列出

$$u_o - u_- = -i_f R_f - u_C = -i_f R_f - \frac{1}{C_f}\int i_f \mathrm{d}t$$

$$i_1 = \frac{u_i - u_-}{R_1}$$

因为 $u_- = u_+ = 0$，$i_1 = i_f$，故得

$$u_o = -\left(\frac{R_f}{R_1}u_i + \frac{1}{R_1 C_f}\int u_i \mathrm{d}t\right)$$

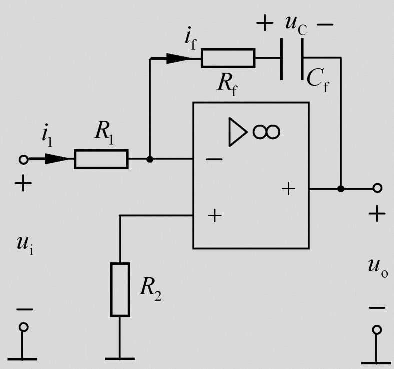


图 8.13　PI 调节器

可见，如图 8.13 所示电路是反相比例运算和积分运算两者结合起来的，所以称之为比例-积分调节器，简称 PI 调节器。

例 8.5 试求图 8.14 所示电路的 u_o 与 u_i 关系式。

解：由图 8.14 可列出

$$u_o = -i_f R_f$$

$$i_f = i_R + i_C = \frac{u_i}{R_1} + C_1 \frac{du_i}{dt}$$

故得

$$u_o = -\left(\frac{R_f}{R_1} u_i + R_f C_1 \frac{du_i}{dt} \right)$$

因此，图 8.14 所示电路称为 PD 调节器。

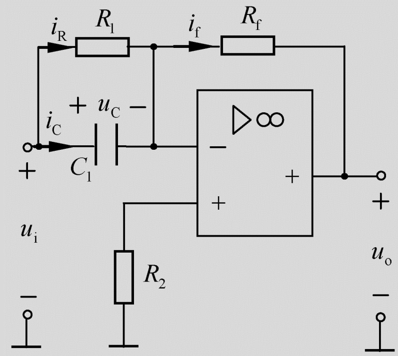


图 8.14　PD 调节器

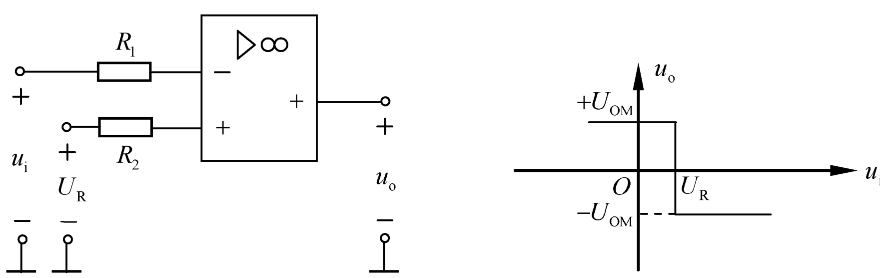
8.2.2　集成运放用于信号处理

集成运放在信号处理方面也得到广泛的应用，常用于信号的幅度比较、信号滤波、波形发生等方面。

1. 电压比较器

电压比较器是对输入信号进行鉴别与比较的电路，在测量、控制、波形发生器中有着广泛的应用，是集成运放的几种非线性典型应用之一。

图 8.15 是一种只有一个参考电压的单限电压比较器（也称简单电压比较器）及其传输特性，U_R 为给定的参考电压，无反馈环节，集成运放工作在非线性区。

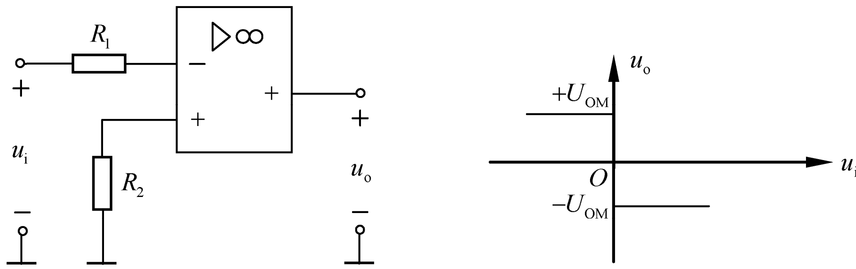


(a) 电路　　(b) 传输特性

图 8.15　电压比较器

当 $u_i<U_R$ 时，$u_o=+U_{OM}$；当 $u_i>U_R$ 时，$u_o=-U_{OM}$。因此，由输出电压的正负即可判断输入电压 u_i 与给定值 U_R 的相对大小。

当 $U_R=0$ 时，即参考电压为 0V 时，称为过零比较器。其电路和传输特性如图 8.16 所示。



(a) 电路　　(b) 传输特性

图 8.16　过零电压比较器

当 $u_{\rm i}$ 为任意交变的信号时，输出 $u_{\rm o}$ 将为方波，如图 8.17 所示。利用过零比较器可将任意输入波形整形成方波。

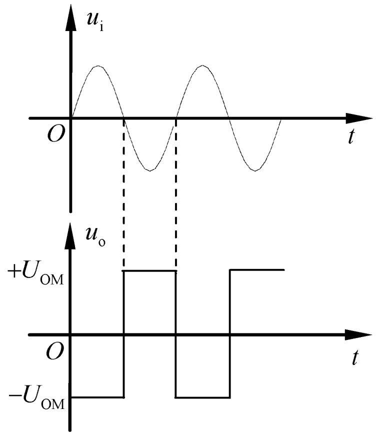


图 8.17　过零电压比较器输入输出波形图

2．方波发生器

过零比较器输出的方波是外加正弦波转换过来的，实质上是一种波形转换电路。如果在运算放大器的同相输入端引入适当的电压正反馈，使电路的电压放大倍数更高，则运算放大器在不接外部信号的情况下就可自行输出方波。

如图 8.18 为方波发生器的基本电路，输出电压 $u_{\rm o}$ 经电阻 R_1、R_2 分压，将部分电压通过 R_3 反馈到同相输入端作为基准电压，其基准电压为

$$u_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} u_{\rm o}$$

u_2 与 $u_{\rm o}$ 同相位，同时，输出电压 $u_{\rm o}$ 又经 $R_{\rm F}$ 与 C 组成的积分电路，将电容电压 $u_{\rm c}$ 作为输入电压接至反相端，与基准电压 u_2 进行比较。

如在接通电源之前，电容电压 $u_{\rm c}$=0，则接通电源之后，由于干扰电压的作用，将使输出电压 $u_{\rm o}$ 很快达到饱和值，其极性随机而定。如设 $u_{\rm o}$=+$U_{\rm OM}$,则同相输入端电压为

$$u_+ = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_{\rm OM} = +U_{\rm 2M} \tag{8-17}$$

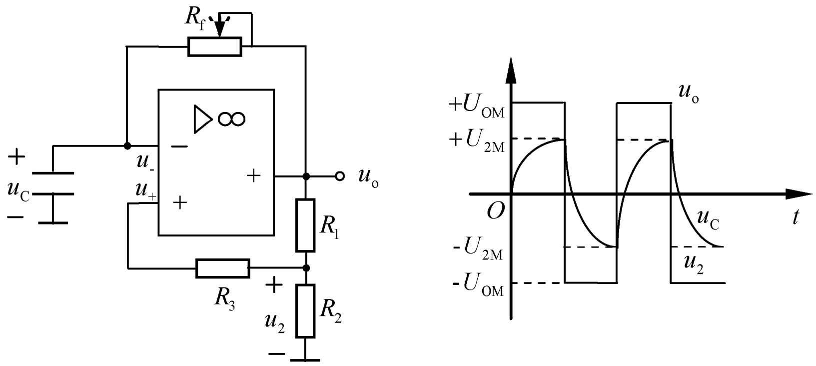


图 8.18　方波发生器及波形图

同时，随着电容的充电，反相输入端电压 $u_{-}=u_{c}$ 按指数规律上升，当 u_{-} 略大于 u_{+}时，输出电压变为负饱和值，此时

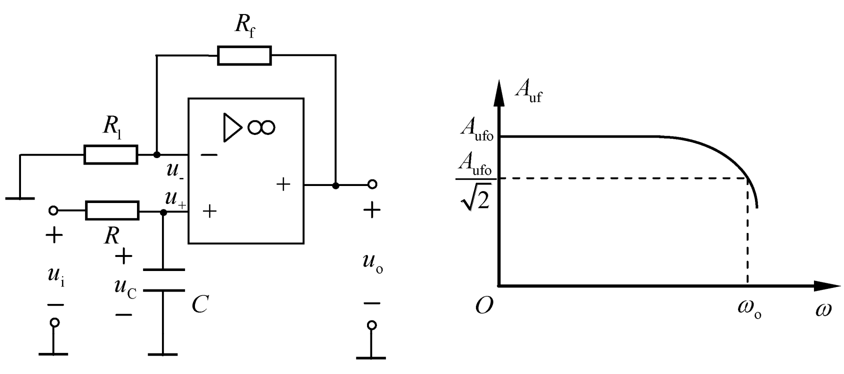
$$u_{+}=-\frac{R_2}{R_1+R_2}U_{OM}=-U_{2M} \tag{8-18}$$

之后，电容通过 R_F 和输出端放电并进行反向充电，当 u_-略小于 u_+时，输出电压由负饱和值变为正饱和值。周而复始，形成振荡，输出序列方波。

3．有源滤波器

滤波器是一种能让某一部分频率的信号顺利通过而另一部分频率的信号受到较大幅度衰减的电路。按频率范围的区别，可分为低通、高通、带阻、带通等几种。

低频信号可以通过而高频信号不能通过的滤波器，称低通滤波器，图 8.19 所示是有源低通滤波器的电路。因运算放大器是有源元件，所以这种滤波器称为有源滤波器。有源滤波器具有体积小、效率高、频率特性好等优点，应用广泛。



(a) 电路　　(b) 幅频特性

图 8.19　有源低通滤波器

根据图 8.19（a）可得

$$\dot{U}_{-} = \frac{R_1}{R_1 + R_f}\dot{U}_o$$

$$\dot{U}_{+} = \dot{U}_C = \frac{\frac{1}{j\omega C}}{R + \frac{1}{j\omega C}}\dot{U}_i$$

因为$\dot{U}_{+} = \dot{U}_{-}$，所以可得

$$\dot{A}_{uf} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{1 + \frac{R_f}{R_1}}{1 + j\frac{\omega}{\omega_o}} \tag{8-19}$$

$$\omega_o = \frac{1}{RC} \tag{8-20}$$

当 $\omega = 0$ 时

$$A_{ufo} = 1 + \frac{R_f}{R_1} \tag{8-21}$$

当 $\omega = \omega_o$ 时

$$A_{uf} = \frac{1 + \frac{R_f}{R_1}}{\sqrt{2}} = \frac{A_{ufo}}{\sqrt{2}} \tag{8-22}$$

可见 $\omega = \omega_o$ 时的电压放大倍数下降为 $\omega = 0$ 时的 $1/\sqrt{2}$ 。ω_o 称为截止角频率。幅频特性如图 8.19（b）所示。若将有源低通滤波器中 RC 电路的 R 和 C 对调一下，则成为有源高通滤波器。

8.3　应 用 举 例

例 8.6 数字式温度计。

在实际生产、生活、工程试验中，自动化的程度越高，应用传感器测试监控的技术就越先进。利用传感器或其他途径采集信号，已经成为自动化技术的基础。但是采集来的信号通常都非常微弱，必须通过集成运算放大器对其进行放大，这可以利用集成运算放大器的线性区来实现。以采用 PN 结温度传感器的数字式温度计为例，其电路由测量桥、放大电路和电压跟随器这三部分组成，如图 8.20 所示。

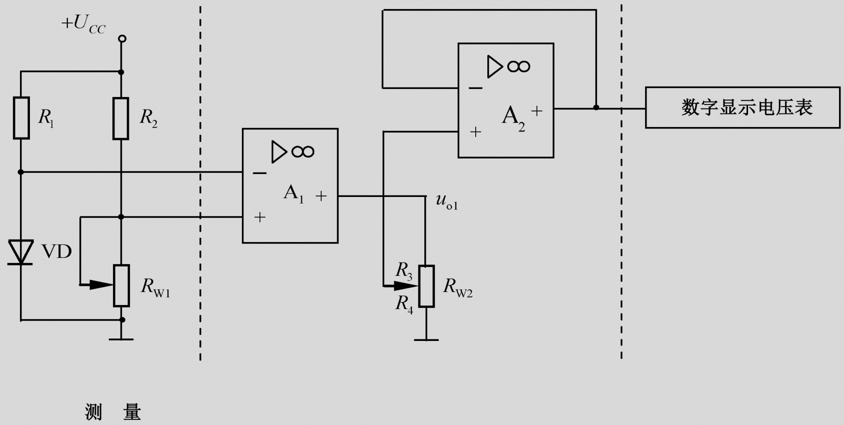


图 8.20　数字式温度计

图 8.20 中，VD 为温度传感器，R_1、R_2、VD 和 R_{W1} 构成测量桥。电桥的输出信号输入到差动集成放大器 A_1 的输入端进行放大。A_2 是一个电压跟随器，起隔离作用。最后将信号送至数字电压表进行显示。

例 8.7　多媒体电脑有源音响功放电路。

现今，电脑已经日益普及，许多人都希望自己动手组装一台电脑，既学会了本领，又节约了开支。在组装兼容机时，有源音箱是完全可以自制的。这里给出的电路，成本低，简单易做，而且性能还好，同时它的输出功率也比较大。当电源电压为 6V 时，其最大输出功率为 4W；当外接电源为 12V 时，其最大输出功率可达到 10W 以上。

多媒体电脑有源音响功放的电路如图 8.21 所示，由两片 KD28 功放集成电路组成 BTL 放大器，为了节省成本，音量用电脑软件控制，免去了音量控制电位器。电源可以用 4 节 1 号电池，也可以用 6V 稳压电源来代替。

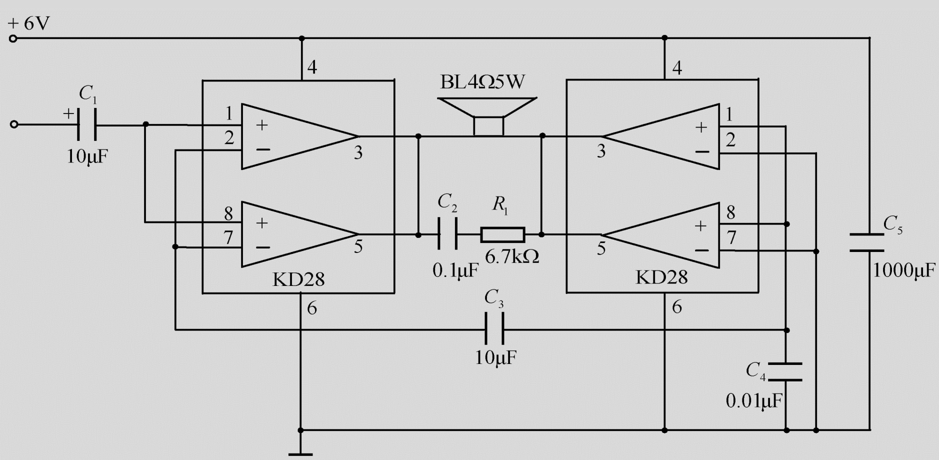


图 8.21　多媒体电脑有源音响功放电路图心电放大电路

例 8.8 心电图机。

心电图机是一种记录心脏活动时所产生的生理电信号的仪器。它通过电机将体表不同部位的信号检测出来，送入放大器加以放大，再用记录器描记下来，这样就可以得到心电图形。心电图机以其操作简便，对病人无损伤等优点，已经成为各级医院最普及的医用电子仪器之一。图 8.22 为某心电图机的原理结构图。

心电图机主要由输入电路、心电放大电路、电源电路、心电记录器和电动机走纸电路等部分组成。其中，心电放大电路是心电图机的核心，它的作用是将心电信号放大到足以推动记录器工作。而心电放大电路由前置放大器、电压放大器和功率放大器三部分组成。前置放大器的作用是将输入电路的微弱的（变化缓慢的）心电信号进行放大。电压放大器的作用是进一步放大前置放大器放大后的心电信号。功率放大器的作用是把电压放大器放大后的信号变换为大电流和功率以推动记录器工作。

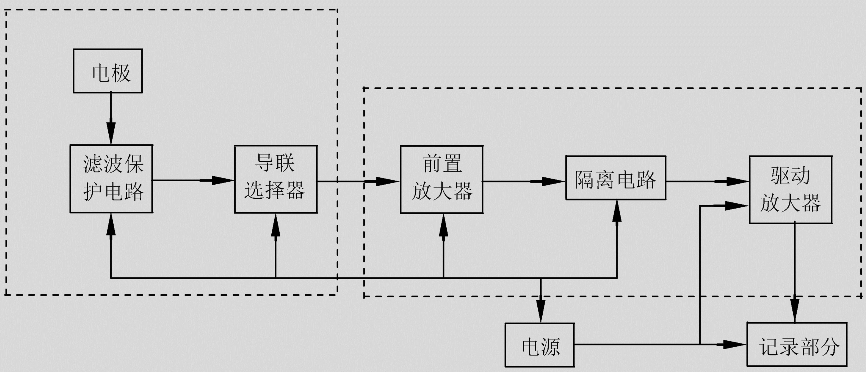


图 8.22　心电图机的原理结构图

本 章 小 结

集成运放是一种具有很高放大倍数的多级放大电路。分析集成运放的各种应用电路时，应将其理想化。理想运算放大器作为线性应用时，其基本特点是：$u_+=u_-$（虚短）,$i_+=i_-=0$（虚断）。若要使运算放大器工作在线性状态，必须引入负反馈。作为非线性应用时，理想运算放大器的输出只有正、负两种饱和状态：当 $u_+>u_-$时，$u_o=+U_{OM}$；当 $u_+<u_-$时，$u_o=-U_{OM}$。

集成运放在线性应用时，需引入深度负反馈，可实现对输入信号的多种运算，还可实现信号的测量、有源滤波。而集成运放在非线性应用时，通常是开环状态或引入正反馈，可组成电压比较器或信号发生器等。

习　题　8

8.1　填空题

（1）集成运放的电压传输特性分为_______区和________区。

（2）集成运放工作在线性区时需引入____________。

（3）集成运放工作在非线性区时需________或引入__________。

（4）________和________是分析集成运放线性应用电路的重要依据。

（5）在运算电路中，运算放大器工作在________区。

（6）集成运放的非线性应用电路有____________、____________等。

（7）电压比较器中，集成运算放大器工作在非线性区，输出电压只有______和_____两种状态。

（8）对理想运算放大器，其输入阻抗为 ________，输出阻抗为________。

8.2　如题 8.23 图所示电路，试问：

（1）若 $R_1 = 20\text{k}\Omega$， $R_f = 100\text{k}\Omega$，则 u_o 与 u_i 的运算关系如何？R_2 取何值？

（2）若 $R_f = 100\text{k}\Omega$，欲使 $u_o = 26u_i$，则 R_1、R_2 取值多少？

8.3　在题 8.24 图中， $R_1 = 50\text{k}\Omega$， $R_f = 50\text{k}\Omega$， $R_2 = 25\text{k}\Omega$，u_{i1}=−1V，u_{i2}=3sinωt（V），试画出输出电压 u_o 的波形，并在波形上标出电压值。

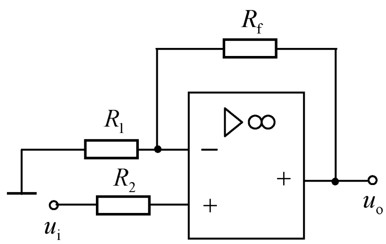


图 8.23　习题 8.2 图

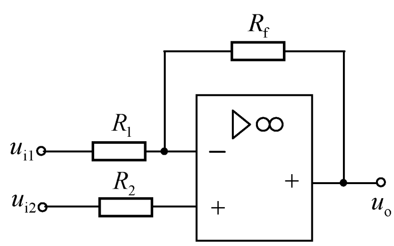


图 8.24　习题 8.3 图

8.4　反相输入运算放大器电路如图 8.25 所示。R_L 为分压电位器，其阻值远小于 R_f，求证：

$$\frac{u_o}{u_i} = -\frac{R_f}{R_1}\frac{R_{L1}+R_{L2}}{R_{L2}}$$

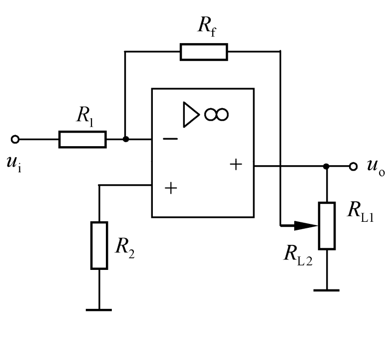


图 8.25　习题 8.4 图

8.5　如图 8.26 所示电路，试证明：

$$u_o = \left(1+\frac{R_1}{R_2}\right)(u_{i2}-u_{i1})$$

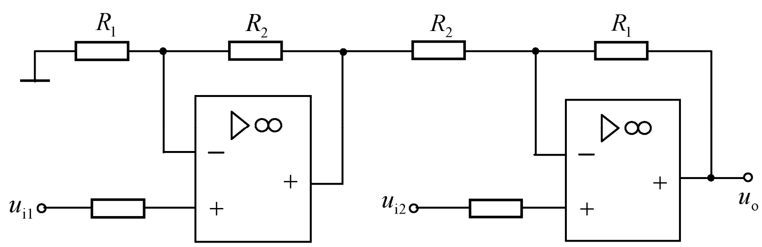


图 8.26　题 8.5 图

8.6　试求图 8.27 电路中所示各电路的输入与输出的关系。

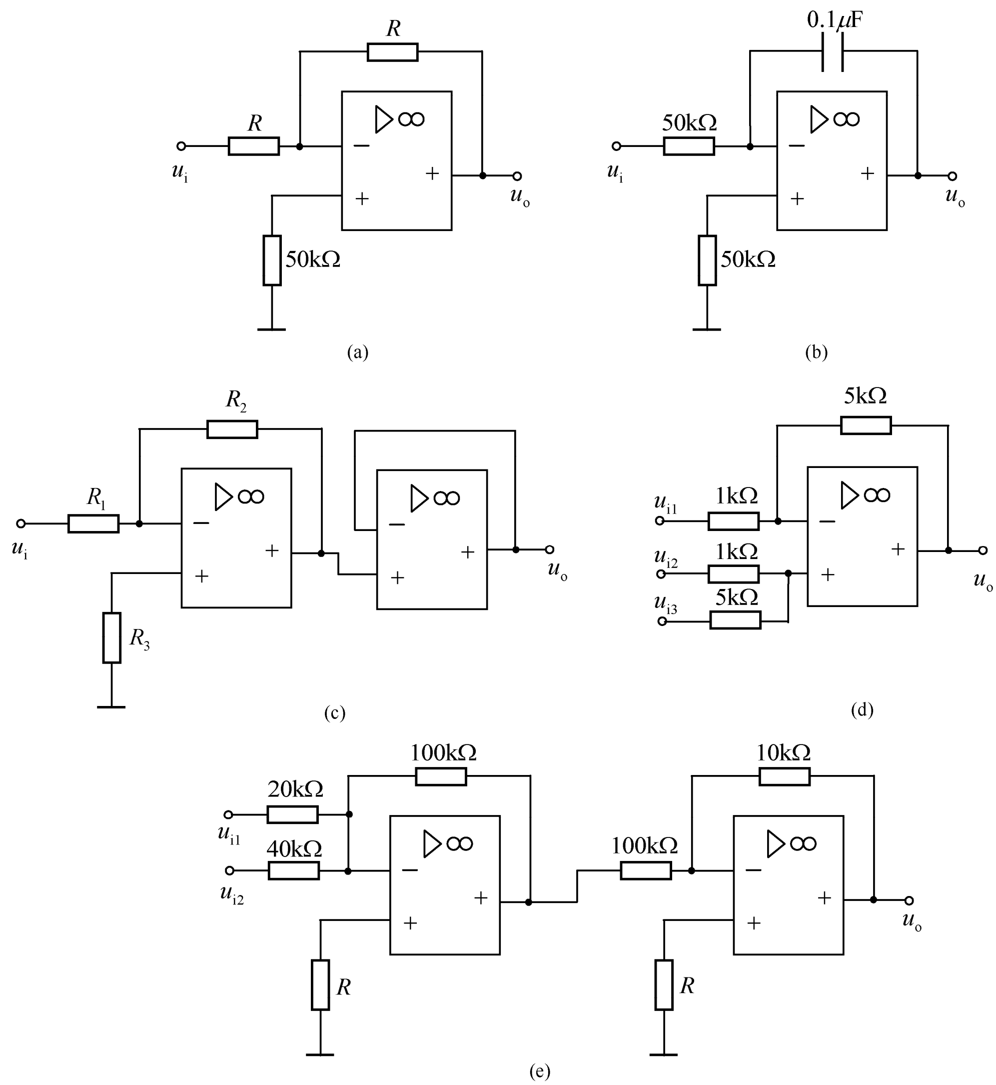


图 8.27　习题 8.6 图

8.7　将积分和微分运算电路改为同相输入的接法，如图 8.28 所示，试分析其 u_o 与 u_i 之间具有何种运算关系？写出数学表达式。

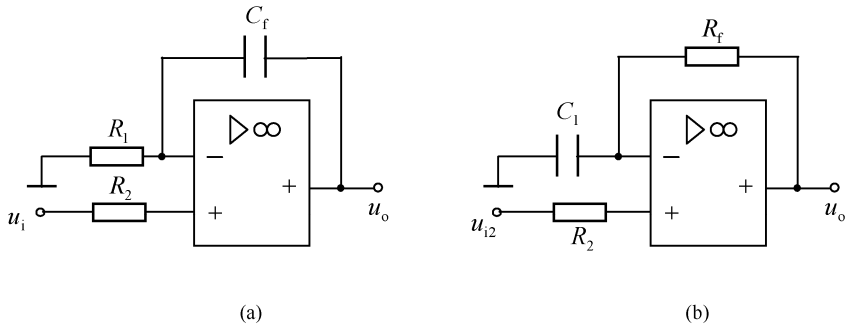


图 8.28　习题 8.7 图

8.8　求如图 8.29 所示电路中 u_o、u_i 的运算关系。

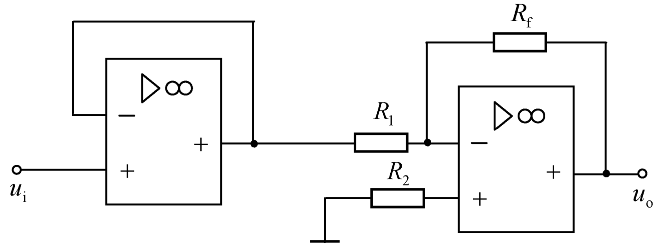


图 8.29　习题 8.8 图

8.9　求如图 8.30 所示电路中 u_o、u_i 的运算关系。

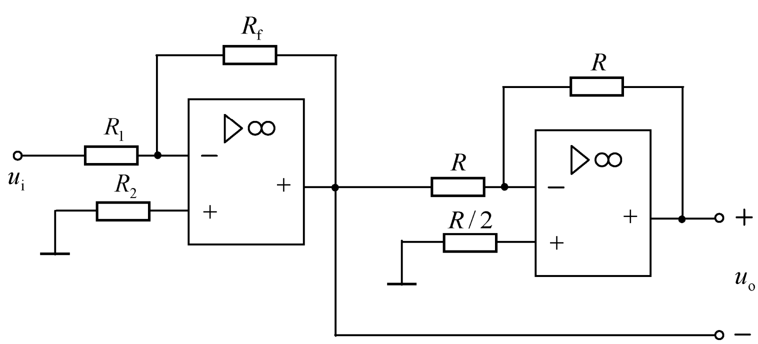
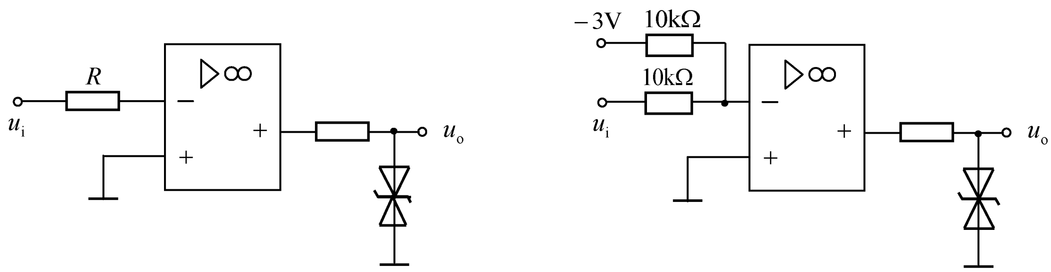


图 8.30　习题 8.9 图

8.10　画出图 8.31 所示各电路 u_o 与 u_i 的关系曲线，图中所有稳压管 U_Z=5.3V，正向导通电压均为 0.7V，u_i 均为正弦信号。



(a)　　(b)

图 8.31　习题 8.10 图

8.11　按下列各运算关系及条件要求画出运算电路，并计算各电阻的阻值。

（1）$u_o = 2u_{i2} - u_{i1}$，$R_f = 10\text{k}\Omega$。

（2）$u_o = -10\int u_{i1}\text{d}t - 5\int u_{i2}\text{d}t$，$C_f = 1\mu\text{F}$。

8.12　试分析图 8.32 所示电路。当继电器触点 S 以一定时间作周期性的断开和闭合时，试问输出电压为何种波形？设 R 较小，S 闭合后电容迅速放电。

8.13　如图 8.33 所示为应用运算放大器测量电阻的原理电路，输出端电压表满量程为 5V。当电压表指示 5V 时，试计算被测电阻 R 的阻值。

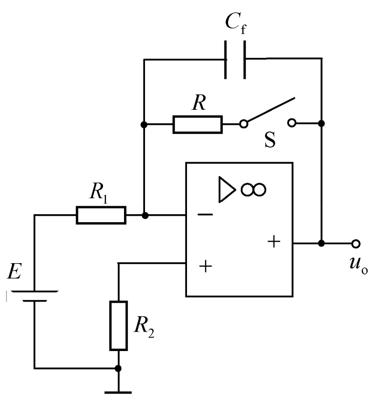


图 8.32　习题 8.12 图

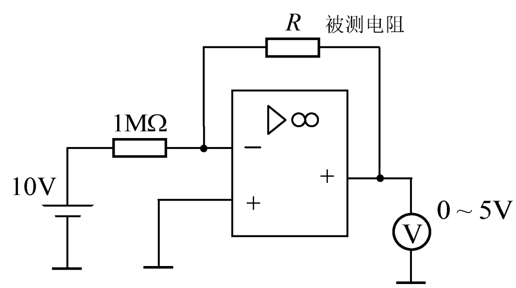


图 8.33　习题 8.13 图

8.14　写出如图 8.34 所示电路的 u_o 与 u_Z 的关系式，并说明其功能。当 R_L 改变时，u_o 有无变化？调节 R_f 起何作用？

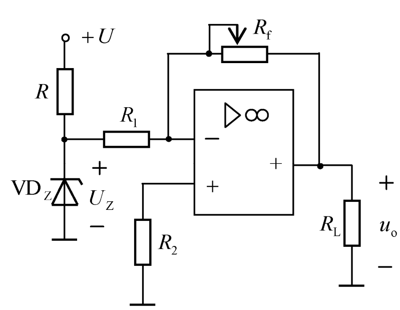


图 8.34　习题 8.14 图

8.15　如图 8.35 所示为一监控报警装置原理图，如需对某一参数（如温度、压力）进行监控，可由传感器取得监控信号 u_i 、U_R 为参考电压。当 u_i 超过正常值时，报警灯亮，试说明其工作原理。二极管 VD 和电阻 R_3 在此起何作用？

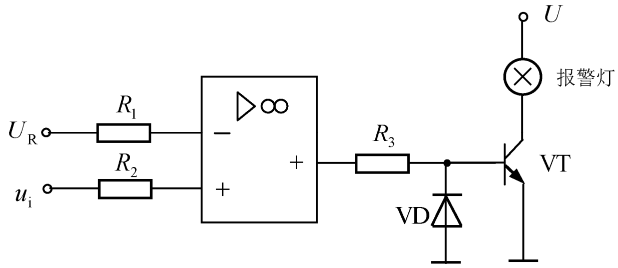


图 8.35　习题 8.15 图

附录 A 《电工电子技术》实验指导

实验一 电路基本定理研究

一、实验目的

（1）学会使用直流稳压电源、直流电压表和毫安表。
（2）通过实验加深对 KCL、KVL 和叠加原理的理解。
（3）用实验方法验证基尔霍夫定律和叠加原理。

二、预习内容

（1）电流和电压参考方向（正方向）的概念。
（2）对基尔霍夫定律进行预习。
（3）预习叠加原理，注意其应用条件

三、实验设备

（1）直流电压表	1 只
（2）直流毫安表	1 只
（3）双路直流稳压电源	1 台
（4）直流实验电路板	1 块
（5）连接导线	若干

四、实验原理

1．基尔霍夫定律

基尔霍夫电流（KCL）定律：在电路中，任何时刻，对任一节点，所有支路电流的代数和恒等于零，即

$$\sum I = 0$$

基尔霍夫电压（KVL）定律，在电路中，沿任一回路内所有支路或元件电压的代数和恒等于零，即

$$\sum U = 0$$

2．叠加原理

在任一线性电路中，多个激励同时作用引起的响应之和等于每个激励单独作用时引起的响应之和。所谓某一激励单独作用，就是除了该激励外，其余激励均置零，即理想电压源用短路线代替，理想电流源用开路代替。对于实际电源，电源内阻必须保留在原电路中。叠加定理不能用于功率的分析。

五、实验内容及步骤

1．基尔霍夫电流（KCL）定律的验证

（1）先观察直流实验电路板（如图 A-1 所示）的结构、参数及用法。

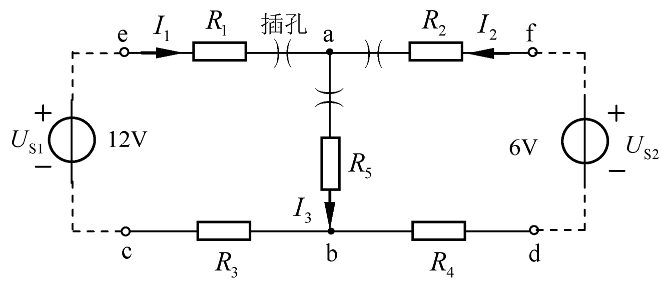


图 A-1　电路定理研究接图

（2）观察双路直流稳压电源的用法，并将一路输出调至 12V 作为 U_{s1}，另一路输出调至 6V 作为 U_{s2}，均连接在实验电路板上，注意电源的极性。

（3）用直流毫安表测出三个支路电流 I_1、I_2、I_3，将数据填在表 A-1 中，注意测量的电流的参考方向与符号。

表 A-1　KCL 定律的验证

	支路电流(mA)			验证 $\Sigma I=0$
	I_1	I_2	I_3	
测量值				
计算值				
绝对误差				

注：计算值根据实验板中各电路元件旁标注的标称值计算得到。

2．基尔霍夫电压（KVL）定律的验证

（1）如图 A-1 所示，选左、右两网孔为验证回路。

（2）用直流电压表分别测出电路中各段电压 U_{ab}、U_{bc}、U_{ce}、U_{ea}、U_{ab}、U_{bd}、U_{df} 、U_{fa}，将数据连同测得的符号一同填入表 A-2 中，注意各电压值的正负号。

表 A-2　KVL 定律的验证

	回路Ⅰ支路电压(V)					回路Ⅱ支路电压(V)				
	U_{ab}	U_{bc}	U_{ce}	U_{ea}	验证 $\Sigma U=0$	U_{ab}	U_{bd}	U_{df}	U_{fa}	验证 $\Sigma U=0$
测量值										
计算值										
绝对误差										

注：计算值根据实验板中各电路元件旁标注的标称值计算得到。

3．验证叠加原理

（1）电压源U_{S1}单独作用，电压源U_{S2}用短路代替，测量电路中各支路电流I_1、I_2、I_3，填入表 A-3 中。

（2）电压源U_{S2}单独作用，电压源U_{S1}用短路代替，测量电路中各支路电流I_1、I_2、I_3，填入表 A-3 中。

（3）电压源U_{S1}和U_{S2}同时作用，测量电路中各支路电流I_1、I_2、I_3，填入表 A-3 中。

表 A-3　叠加原理的验证

	I_1(mA)	I_2(mA)	I_3(mA)
电压源 U_{S1} 单独作用			
电压源 U_{S2} 单独作用			
两个电压源同时作用			

六、实验报告要求

（1）根据实验数据分别验证 KCL、KVL 和叠加原理的正确性。

（2）分析讨论本次实验与理论上存在差异的原因。

实验二　日光灯电路及功率因数的提高

一、实验目的

（1）掌握正弦交流电路中电压、电流的相量关系。

（2）了解日光灯电路的组成、工作原理和线路的连接。

（3）学习提高功率因数的方法。

（4）掌握交流电压表、交流电流表、功率表和功率因数表的使用方法。

二、预习内容

（1）预习日光灯的工作原理。

（2）学习交流电压表、交流电流表、功率表和功率因数表的接线和使用方法。

（3）预习有关功率因数提高的方法。

三、实验设备

（1）单相调压器 2kVA	1 台
（2）交流电压表 50~250V	1 只
（3）交流电流表 500mA	1 只
（4）日光灯实验板	1 块
（5）电容器	1 个
（6）单相数字功率表	1 只

四、实验原理

1．日光灯的工作原理

大多数日光灯电路包括灯管、镇流器、启动器三个器件，它们的连接电路如图 A-2 所示，其中镇流器是一个具有铁芯的电感线圈，主要用来限制电路中的电流，其规格应与灯管选配一致。启动器是一个小型氖气泡，有一个固定电极和可动电极，灯管正常工作时，启动器两极是断开。日光灯是感性负载，其功率因数大约在 0.5。

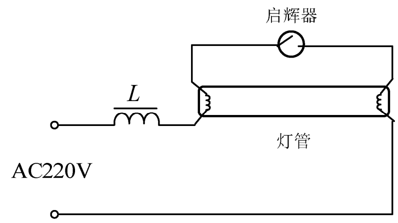


图 A-2　日光灯的工作原理

当图 A-2 所示电路接通电源后，将 220V 交流电压全部加在启动器两端，启动器两电极之间产生辉光放电，使电极加热而接触，从而接通灯丝电路，使灯丝预热，在启动器两电极接触后，辉光放电停止，两电极因温度下降而复原，使电路断开。在断开瞬间，镇流器产生很高的自感电动势加到灯管两端，使热灯丝之间产生弧光放电并射出紫外线，管壁内所涂荧光粉因受紫外线激发而发出可见光。

2．功率的计算及提高功率因数的方法

电源把电能通过输电线传给负载，在工频下，负载阻抗 Z_L 可以看成是电阻 R_L 和感抗 X_L 相串联的结果，即 $Z_L = R_L + jX_L$。若电源输出端电压为 U，负载功率因数为 $\cos\varphi$，则负载所吸收的有功功率为 $P = UI\cos\varphi$。

实际应用中，感性负载很多，如电动机，变压器，以及日常照明用的日光灯，其功率因数很低，传输效率低，发电设备的容量得不到充分的利用。所以，应该设法提高功率因数。通常是在感性负载的两端并联一个电容器，这样以流过电容器的容性电流补偿感性负载的感性电流。此时负载消耗的有功功率虽然不变，但由于功率因数的提高，输电线路上的总电流减小，线路压降减小，线路损耗降低。

五、实验内容及步骤

（1）按图 A-3 所示接好线路，经实验指导老师检查后，合上电源。

（2）调压器调至 220V，日光灯能正常发光后，测出各元件的电压、电流、功率，填表 A-4 中，计算功率因数。

表 A-4　日光灯的功率因数测量

测量值				计算值
I(A)	I_L(A)	P(W)	$\cos\varphi$	$\cos\varphi$

（3）闭合开关接入电容 C，并联电容按表 A-5 中的顺序从小到大增加，记下各情况下的功率和电流值，并计算功率因数的变化。

表 A-5 日光灯的功率因数的提高

电容(μF)	测 量 值					计算值
	I(A)	I_L(A)	I_C(A)	P(W)	cosφ	cosφ
1.47						
2.2						
3.2						
4.7						
6.9						

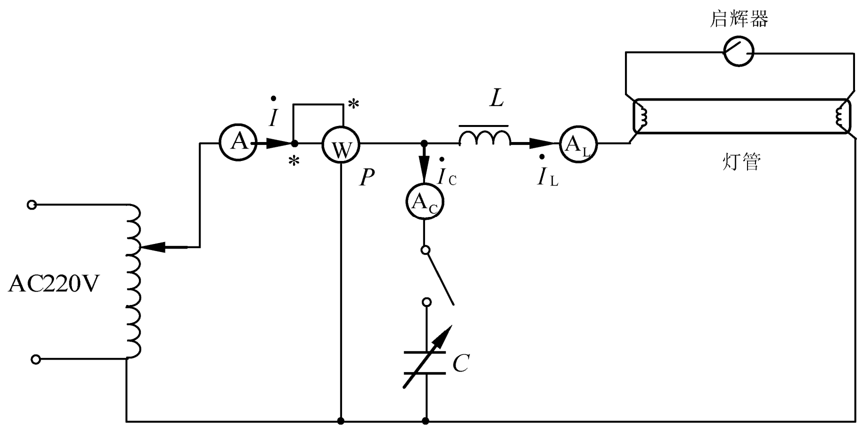


图 A-3 提高功率因数接线图

六、实验注意事项

（1）单相调压器应从零逐渐上升，待日光灯全亮后保持电压$U=220\text{V}$。

（2）镇流器必须与灯管串联以免损坏灯管，整个实验过程中不必中途断电。

七、实验报告要求

（1）列表，整理实验数据。

（2）总结功率因数提高的方法，画出相关电路，并说明原理。

实验三 三相交流电路研究

一、实验目的

（1）练习三相负载的连接方法。

（2）验证对称三相电路负载不同连接时，各相、线之间的电流、电压关系。

（3）观察不对称三相负载线、相之间的电流、电压关系。

（4）了解三相四线供电系统中中线的作用。

二、预习内容

（1）复习对称三相交流电路中相、线电流电压的相互关系。

（2）复习不对称三相交流电路中相、线电流电压的相互关系。

三、实验设备

（1）交流电压表	0~500V	1 只
（2）交流电流表	0~5A	1 只
（3）三相灯泡组负载	220V、15W 的白炽灯	6 只

四、实验原理

（1）图 A-4 是星形连接三线制供电图。当线路阻抗忽略不计时，负载的线电压等于电源的线电压，若负载对称（$Z_A = Z_B = Z_C = Z$），则负载中性点 N′和电源中性点 N 之间的电压为零。此时负载的相电压对称，线电压U_L和相电压U_P满足$U_L = \sqrt{3}U_P$的关系。若负载不对称，则负载中性点 N′和电源中性点 N 之间的电压不再为零，负载端的各相电压不再对称。

（2）图 A-5 是对应于图 A-4 星形连接三相电路的相量图。在三相负载对称时，图中负载中性点 N′与电源中性点 N 重合；负载不对称时，虽然电源电压对称，但负载的相电压$\dot{U}_{A'N'}$、$\dot{U}_{B'N'}$和$\dot{U}_{C'N'}$不再对称，负载中性点 N′发生位移，$\dot{U}_{N'N}$称为中性点位移。

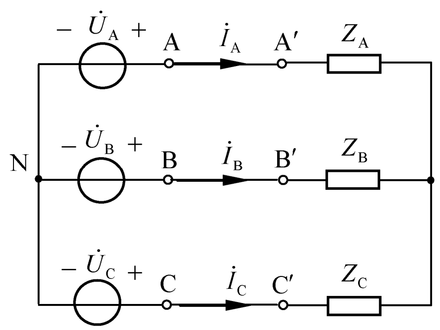


图 A-4　三相三线制电路

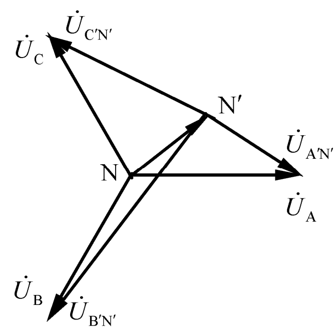


图 A-5　相量图

（3）在图 A-4 中，若把电源中性点 N 和负载中性点 N′间用中线连接起来，就成为三相四线制。在负载对称时，中线电流等于零，其工作情况与三线制相同；负载不对称时，忽略线路阻抗，则负载端相电压仍然相对称，但这时中线电流不再为零，它可由计算方法或实验方法确定。

五、实验内容及步骤

（1）在断电状态下，将三相负载接成星形负载，由于实验中需要测量线电流，所以要在每条线路上串入一个电流插孔，如图 A-6 所示。

（2）将三相负载接成星形对称负载。接线完毕，指导老师检查无误后，接通电源，观察灯泡亮度，测量中线电流、线电流、线电压、相电压、及中性点 N 和 N′之间电压，将测得数据填入表 A-6 中。

（3）断开中线，测量中线电流、线电流、线电压、相电压、及中性点 N 和 N′之间电压，将测得数据填

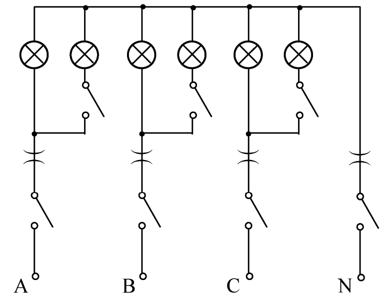


图 A-6　实验接线图

入表 A-6 中。

（4）将负载接成有中线、不对称星形负载，测量中线电流、线电流、线电压、相电压、及中性点 N 和 N′ 之间电压，将测得数据填入表 A-6 中。

（5）将负载接成无中线、不对称星形负载，测量中线电流、线电流、线电压、相电压、及中性点 N 和 N′ 之间电压，将测得数据填入表 A-6 中。

表 A-6

项目		线电压（V）			相电压（V）			电流（A）			中性点位移	中心线电
		U_{AB}	U_{BC}	U_{CA}	$U_{AN'}$	$U_{BN'}$	$U_{CN'}$	I_A	I_B	I_C	$U_{NN'}$	流 I_N
负载对称	带中线											
	无中线											
负载不对称	带中线											
	无中线											

（6）电路接成三相对称负载，带中线，断开一相火线，测量中线电流、线电流、相电压，将测得数据填入表 A-7 中。

表 A-7

$U_{AN'}$	$U_{BN'}$	$U_{CN'}$	I_A	I_B	I_C	I_N	灯泡亮度		
							D_A	D_B	D_C

（7）电路接成三相对称负载，断开一相火线，且断开中线，测量中线电流、线电流、相电压，将测得数据填入表 A-8 中。

表 A-8

$U_{AN'}$	$U_{BN'}$	$U_{CN'}$	I_A	I_B	I_C	I_N	灯泡亮度		
							D_A	D_B	D_C

六、实验报告要求

（1）根据表中两种对称情况（即有中线和无中线）的数据，分析计算线、相电压，线、相电流的数量关系，若两种情况下计算的结果、或者测定的实验数据有差异，分析讨论是什么原因？

（2）根据以上各种不对称情况（负载不对称、断一相火线、断两相火线时），在有中线和无中线两种条件下的实验现象和数据的区别，分析讨论在三相四线制供电系统中中线的作用。

实验四　三相异步电动机的继电接触控制

一、实验目的

（1）了解交流接触器、热继电器和按钮等几种常用控制电器的结构，并熟悉它们的连接方法。

（2）加深理解三相异步电动机直接起动控制线路的工作原理及各环节的作用。

（3）加深理解电动机正反转控制线路的工作原理、明确自锁和互锁的作用。

二、预习内容

（1）复习三相异步电动机铭牌数据的意义。

（2）复习几种常用控制电器的结构、用途和工作原理。

（3）复习鼠笼式三相异步电动机直接起动控制和正反转控制电路的工作原理，并理解自锁及点动的概念，以及短路保护、过载保护和零压保护的概念。

三、实验设备

（1）三相异步电动机	1 台
（2）交流接触器	2 个
（3）热继电器	1 个
（4）按钮	3 个
（5）万用表	1 块
（6）导线	若干

四、实验内容及步骤

1．三相异步电动机的直接起动控制

在切断电源的情况下，按图 A-7 所示电路接线。通常先用粗线接好主电路，再用细线接控制电路，并且按“先接串联电路、后接并联电路”的方法进行接线。要求在任一连接点上不超过两根导线，以保证接线的牢靠、安全。线路接好后，仍按先主电路后控制电路的顺序依次检查。在确认所接线路正确无误后，便可通电进行控制操作。

（1）点动实验：不接 KM 的自锁触点，按 SB_2。

用手按下 SB_2，电动机转动：手松开 SB_2，电动机停止转动。

（2）直接起动及停车实验：接上 KM 的自锁触点，起动按 SB_2，停车按 SB_1。

用手按下 SB_2，电动机转动；松开 SB_2 后，电动机仍继续转动。按下 SB_1，电动机停止转动。

（3）失压保护实验：电动机起动后，拉开三相开关 S，使电动机停转，模拟电动机失压状态，然后重新合上三相开关 S，不按 SB_2 按钮，观察电动机是否会自行起动。

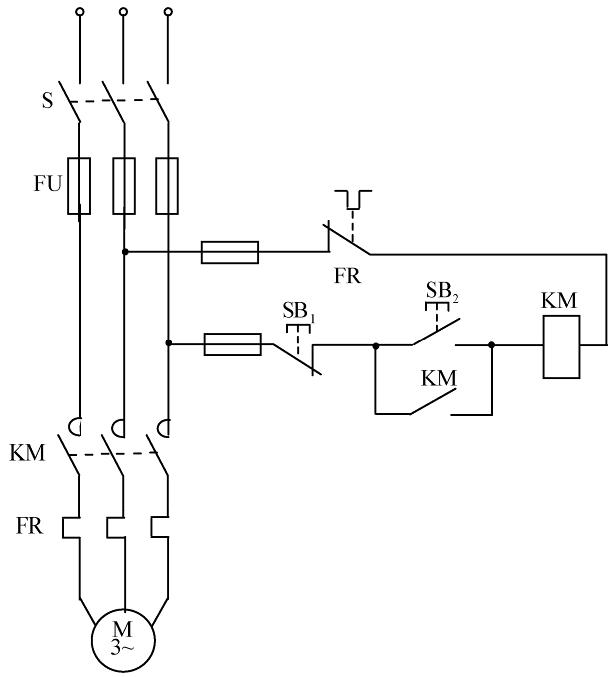


图 A-7 三相异步电动机直接起动控制电路

（4）改变转向实验：拉开三项开关 S，将电动机三相定子绕组与三相电源连线中任意两相对调，再合上三相开关 S，重新起动电动机，观察电动机是否改变了转向。

2．三相异步电动机的正反转控制

在断电情况下，按图 A-8 所示接线并查对线路。由于控制电路比较复杂，可用万用表根据触点闭合或断开状态时控制回路电阻值变化的方法，配合检查接线是否正确。核对检查无误后，便可通电进行正反转控制操作。

注意：本实验系强电实验。接线前(包括改接线路)、实验后都必须断开实验线路的电源，特别改接线路和拆线时必须遵守“先断电、后拆线”的原则。电机在运转时，电压和转速均很高，切勿触碰导电和转动部分，以免发生人身和设备事故。接线或改接线路必须经指导老师检查无误后方可进行实验。

（1）按下正转起动按钮 SB_F，观察电动机转向并设定此方向为正转。

（2）再按下反转起动按钮 SB_R，观察电动机转向，应反转。

（3）按下停止按钮 SB_1，电动机应停止转动。

五、实验报告要求

（1）记录实验过程实验现象。

（2）说明直接起动和正反转控制电路中短路保护、欠压保护和过载保护是如何实现的。

（3）说明异步电动机正反转的控制电路的控制原理，叙述各控制元件的动作过程。

（4）根据正反转控制线路，说明两个接触器不能同时工作的原因及它们的联锁触点的作用。使用复式按钮后，将两个联锁用的常闭触点 KM_F 和 KM_R 去掉是否可以。

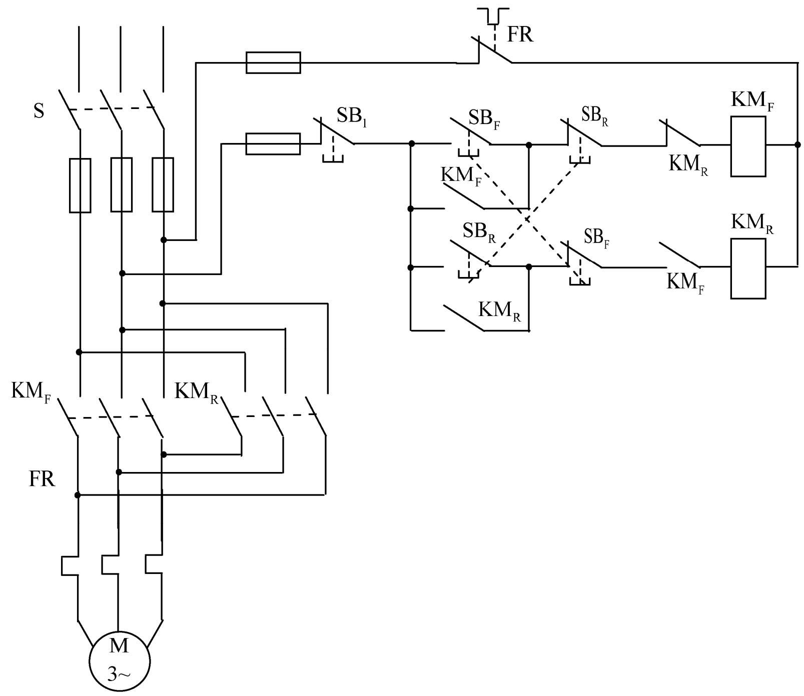


图 A-8　三相异步电动机正反转控制电路

实验五　基本放大电路研究

一、实验目的

（1）加深理解基本放大电路的工作原理。

（2）学习测量放大电路的静态工作点、电压放大倍数。

（3）理解静态工作点对放大倍数和非线性失真的影响。

（4）了解负载电阻对放大倍数的影响。

二、预习内容

（1）复习基本放大电路的组成及各组成部分的作用。

（2）复习放大电路的静态分析。

（3）复习放大电路的动态分析。

三、实验设备

（1）计算机　　　　　　　　1 台

（2）EDA 软件

四、实验内容及步骤

1．进入软件工作平台

进入 C 盘 electben5 文件夹，鼠标双击图标 Wewb32。

2．画图

实验线路图如图 A-9 所示。

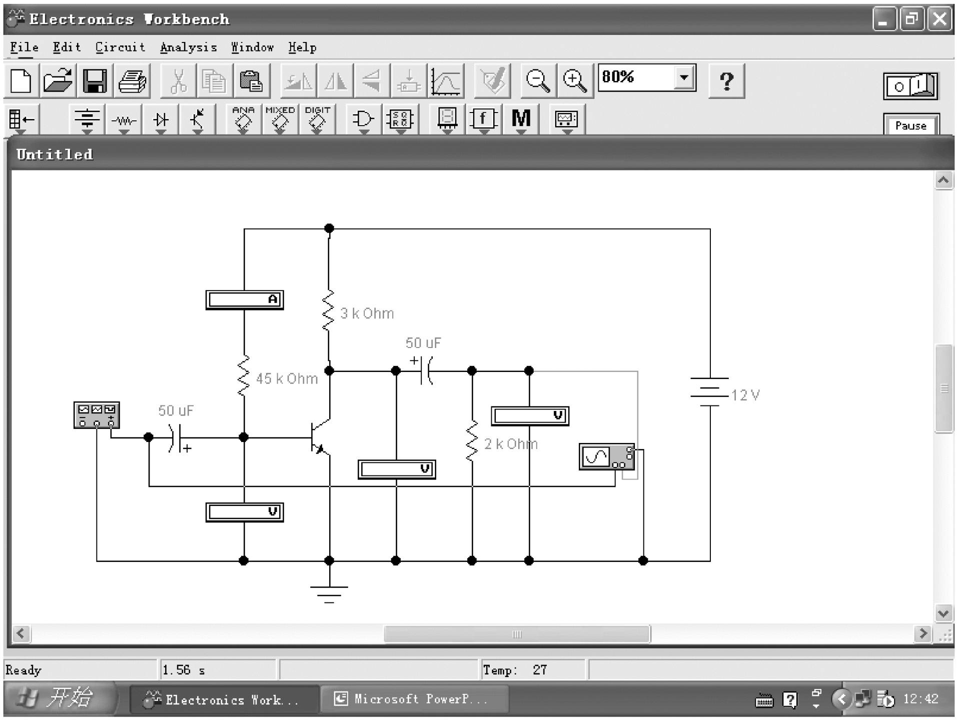


图 A-9 基本放大电路

（1）选择器件及设备。

从主菜单的基础器件库中调出三个电阻为图中的 R_B、R_C、R_L，调出两个电解电容为图中的 C_1、C_2。

从主菜单的晶体管库中调出一个 NPN 型三极管。

从主菜单的电源库中调出一个直流电压源和接地标志。

从主菜单的指示器器件库中调出三个电压表和一个电流表。

从主菜单的仪器库中调出一个信号发生器和示波器。

（2）电路图连接。

按电路图合理布置器件位置并连线，连线原则为：点到点、点到线，即从一个元件的一个端点到另一个元件的一个端点，或从元件的一个端点到一条线上。

3．实验测试

（1）静态工作点的测量。

接通放大电路的直流电源，E_C=12V，令输入电压 u_i=0，取 R_C=3kΩ，C_1=C_2=50μF，R_B 分别取 20kΩ、450kΩ、700kΩ，测量 U_{BEQ}、U_{CEQ} 填入表 A-9 中，并根据 I_B 的值估计静态工作点的位置。

注意：①所有表均为直流表 DC；

②测量 U_{BEQ}，U_{CEQ} 时注意单位；

③静态工作点的位置的三个选项：

A．靠近饱和区（偏高）；

B．靠近截止区（偏低）；

C．位于放大区（合适）。

表 A-9

R_B	U_{BEQ}	U_{CEQ}	I_B	静态工作点的位置
20kΩ				
450kΩ				
700kΩ				

（2）负载电阻对放大倍数的影响。

放大电路的输入端接入交流信号源，并取输入电压 U_i=5mV，f=1kHz。此时 R_B 取 450kΩ。负载电阻 R_L 分别取 2kΩ、3.3kΩ、8.2kΩ，测量放大器的输出电压 U_o，计算电压放大倍数并观察输出波形填入表 A-10 中。

表 A-10

R_L	U_i	U_o	$\dot{A}_u=U_o/U_i$	输入、输出波形
2kΩ				
3.3kΩ				
8.2kΩ				

注意：①与负载 R_L 并联的电压表，即最右侧的电压表为交流表 AC；

②计算 $Au = 1.414*U_o/U_i$，也可根据波形估计出来。

（3）观察静态工作点对电压放大倍数和输出电压波形的影响。

取 R_C=3kΩ，R_L=2kΩ，保持输入电压 f=1kHz，根据表 A-11 调节 R_B 和 U_i 值，测量 U_{BE}、U_{CE}、U_o，并观察输入、输出电压波形填入表 A-11 中。

表 A-11

R_B 的变化	测量值				
	U_{BE}	U_{CE}	U_i	U_o	输入、输出波形
20kΩ			15 mV		
450kΩ			5mV		
1000kΩ			30mV		

五、对实验报告的要求

（1）由实验结果、实验数据和波形分析 R_B 对静态工作点的影响。

（2）分析讨论 R_B 对电压放大倍数和输出电压波形的影响。

（3）分析 R_L 对电压放大倍数的影响。

参 考 文 献

[1] 畅玉亮，樊立萍．电工电子学教程．北京：化学工业出版社，2000.
[2] 樊立萍，张国光，宋婀娜．电工电子技术（第 2 版）．北京：电子工业出版社，2011．
[3] 吴舒辞，朱俊杰．电工与电子技术．北京：北京大学出版社，2006．
[4] 周茜．电路分析基础（第 3 版）．北京：电子工业出版社，2015．
[5] 孔庆鹏．电工学（上册）．北京：电子工业出版社，2015．
[6] 邱关源．电路（第 5 版）．北京：高等教育出版社，2006．
[7] 唐介．电工学（少学时）．北京：高等教育出版社，2005．
[8] 秦曾煌．电工学简明教程（第 2 版）．北京：高等教育出版社，2007．
[9] 杨振坤．应用电工电子技术．北京：电子工业出版社，2011.
[10] 李艳红．电工电子技术及其应用．北京：北京理工大学出版社，2013．
[11] 杨达飞，覃日强．电工电子技术应用（第 2 版）．北京：北京理工大学出版社，2011．
[12] 殷瑞祥，朱宁西．电工电子技术应用教程．北京：机械工业出版社，2008．

反侵权盗版声明

电子工业出版社依法对本作品享有专有出版权。任何未经权利人书面许可，复制、销售或通过信息网络传播本作品的行为；歪曲、篡改、剽窃本作品的行为，均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人应承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。

为了维护市场秩序，保护权利人的合法权益，我社将依法查处和打击侵权盗版的单位和个人。欢迎社会各界人士积极举报侵权盗版行为，本社将奖励举报有功人员，并保证举报人的信息不被泄露。

举报电话：（010）88254396；（010）88258888

传　　真：（010）88254397

E-mail：　dbqq@phei.com.cn

通信地址：北京市万寿路 173 信箱

　　　　　电子工业出版社总编办公室

邮　　编：100036